

МИР знаний

Л. Н. Капцов, В. А. Курочкин

Электронны – полупроводники – транзисторы



Л. Н. КАПЦОВ, В. А. КУРОЧКИН

**Электроны —
полупроводники —
транзисторы**

*Книга для внеклассного чтения учащихся
8—10 классы*

ББК 32.85
К 20

Рецензенты: кандидат физико-математических наук
О. Ф. Кабардин, кандидат педагогических наук В. А. Буров

Леонид Николаевич Капцов
Владимир Алексеевич Курочкин

ЭЛЕКТРОНЫ — ПОЛУПРОВОДНИКИ — ТРАНЗИСТОРЫ

Редактор Л. Л. Величко
Технический редактор М. И. Смирнова
Художественный редактор В. М. Прокофьев
Художники М. А. Салин, Ж. В. Варенцова
Корректор Н. В. Бурдина

ИБ № 6388

Сдано в набор 10.06.81. Подписано к печати 18.11.81. 84×108¹/₃₂.
Бумага для мнгожит, аппаратов. Гарнитура обычн. нов. Печать вы-
сокая. Усл. печ. л. 5,04. Усл. краск-от. 5,46. Уч.-изд. л. 5,13.
Тираж 100 000 экз. Заказ 1468. Цена 15 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение»
Государственного комитета РСФСР по делам издательств, полигра-
фии и книжной торговли, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.
Типография № 2 Росглавполиграфпрома, г. Рыбинск, ул. Чкалова, 8.

Капцов Л. Н., Курочкин В. А.

К 20 Электроны — полупроводники — транзисторы: Кн.
для внеклас. чтения учащихся. 8—10 кл. — М.:
Просвещение, 1982. — 96 с., ил. — (Мир знаний).

В книге в популярной форме рассказывается о зонной модели
твёрдых тел и на ее основе объясняется, почему металлы и полу-
проводники по-разному проводят электрический ток. Рассматрива-
ются основные эксперименты, лежащие в основе зонной теории, а
также принцип действия ряда полупроводниковых приборов и пер-
спективы развития полупроводниковой электроники.

К 4306021100—248 240—82
103(03)—82

ББК 32.85
6Ф0.3

© Издательство «Просвещение», 1982 г.

Эта книга — не учебник. Вы не найдете в ней строгого и последовательного изложения материала с точными формулировками основных законов и доказательствами важных теорем. Целью книги является в наиболее простой и доступной форме, не прибегая к математическим формулам, ознакомить читателя с тем, как современная физика объясняет удивительную способность многих веществ проводить электрический ток.

Простота, к которой мы стремились, как нам кажется, оправдывает такую форму изложения, когда электроны, например, представляются в виде живых человечков, о которых можно сказать, что в металле они «забывают свой атом» и свободно перемещаются между ионами кристаллической решетки, «крепко взявшимися за руки». Конечно, электроны не могут ничего помнить или забывать и никаких рук у ионов нет. Но мы надеемся, что читатель нам простит эти вольности, если они помогут ему уловить суть протекающих процессов.

В первой главе книги рассмотрены процессы, протекающие при направленном движении заряженных частиц в металлах и полупроводниках, показано, как эти частицы — носители электрического заряда — образуются.

Во второй главе книги рассказано, каким образом основные свойства металлов и полупроводников, как электропроводящих материалов, могут быть использованы в электронных приборах.

Книга рассчитана на молодого читателя, которого не удивляет тот факт, что вокруг Земли вращаются тысячи искусственных спутников, что по телевидению можно на-

блюдают за работой космонавтов, что в необозримом космическом пространстве транспортный корабль безошибочно находит станцию «Салют» и стыкуется с ней, и многое другое. Перечисленные факты стали для нас настолько привычными, что мы воспринимаем их как нечто само собой разумеющееся. Мы забываем о том, что все сказанное стало возможно совсем недавно, что прошло только 20 лет с того момента, как человек, наш соотечественник, Юрий Алексеевич Гагарин положил начало освоению космоса.

Вы скажете, что успех советской космонавтики стал возможен в результате работы многих специалистов, инженеров, рабочих и техников, которые сумели создать мощную ракету, преодолевшую земное притяжение, что в этом огромная заслуга главного конструктора, академика Сергея Павловича Королева. Вы, конечно, правы, но не забывайте, что создать ракету для полета в космос — еще не все. Этой ракетой надо управлять. А управлять ракетой было бы совершенно невозможно, если бы развитие электроники в нашей стране застыло где-нибудь на уровне техники конца сороковых годов.

В те годы в радиоаппаратуре безраздельно господствовала вакуумная электронная лампа. Она не могла работать без цепи подогрева ее катода — так называемой цепи накала. Энергия, которая затрачивалась на разогрев только одной лампы, сейчас с лихвой обеспечивает питание высококачественного радиоприемника на транзисторах. А ведь лампа требовала еще подачи напряжения в цепь катод — анод порядка двух-трех сотен вольт! Вот почему в те не такие уж далекие времена мы не могли взять с собой на прогулку в лес маленький радиоприемник.

Что же позволило создать современные легкие и малогабаритные приемники — транзисторы, кассетные магнитофоны, великое множество других приборов, украшающих наш быт, а также многочисленные электронные приборы, применяющиеся во всех отраслях техники?

Ответ на этот вопрос можно дать одной фразой — изобретение в 1948 г. полупроводникового триода, или, как его называли, транзистора. (Позднее в быту транзистором стали называть радиоприемник, собранный на полупроводниковых триодах. В этой книге мы будем под термином «транзистор» понимать первоначальное значение этого слова.)

Транзистор покачивул казавшийся незыблемым авто-

ритет вакуумной электронной лампы и начал стремительно вытеснять ее. Тяжелая, прожорливая и в то же время не терпящая ударов электронная лампа не могла противостоять легкому, экономичному, устойчивому против механических воздействий транзистору.

Транзистор сейчас знаком каждому школьнику-радиолюбителю. Однако все ли отдают себе отчет в том, какие сложные процессы протекают внутри маленькой капсулы, скрывающей от нас полупроводниковый кристаллик, собственно и являющийся транзистором?

Кристаллик простого транзистора, однако, тоже начинает сдавать свои позиции. На смену ему приходят кристаллы более сложной структуры, выполняющие функции уже не одного прибора, а целой радиосхемы. Это кристаллы так называемых интегральных схем. Такие схемы, заменяя действие многих транзисторов, занимают значительно меньше места, так как для современной электроники, обслуживающей космические аппараты и сложнейшие вычислительные машины, и транзистор оказался уже слишком громоздким и тяжелым. Кроме того, применение интегральных схем существенно упрощает и ускоряет монтаж радиоаппаратуры, а также повышает ее надежность.

На рисунке 1 показаны такие схемы — небольшие капсулы со множеством контактных выводов. Рядом изображено несколько транзисторов. От интегральных схем они внешне отличаются наличием только трех контактных проводочек. Для сравнения в компанию полупроводниковых приборов попала относительно малогабаритная электронная лампа широко распространенной когда-то «пальчиковой» конструкции.

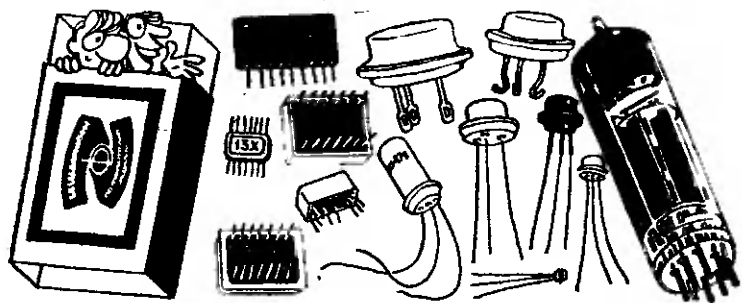


Рис. 1

вой» серии. Коробка спичек поможет вам оценить размеры приборов.

Многие из вас уже держали в руках вычислительную машинку размером с небольшой блокнот. Такая карманная машинка способна производить быстро и точно по крайней мере все четыре арифметические действия. Более сложные, но таких же габаритов машинки могут сверх этого находить натуральные и десятичные логарифмы чисел, вычислять тригонометрические функции, запоминать числа, извлекать квадратные корни и многое другое. И, как правило, такие вычислительные машинки содержат всего один кристаллический прибор — сложную интегральную схему, заменяющую тысячи транзисторов.

Вычислительные машины, применяемые теперь буквально везде, начиная с систем выдачи железнодорожных и авиационных билетов, регулирования уличного движения, управления комплексами станков и кончая системами управления сложнейшими экспериментами и системами, обеспечивающими полет искусственных космических тел, содержат сотни транзисторов и интегральных схем.

Вот почему в принятом на XXVI съезде КПСС документе «Основные направления экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года» содержатся такие слова: «Развивать производство сверхчистых, полупроводящих и сверхпроводящих... материалов и изделий из них с комплексом заданных свойств».

В этом документе также отмечается, что необходимо сосредоточить усилия и на решении среди многих других такой важной задачи, как «совершенствование вычислительной техники, ее элементной базы...»

Таким образом, XXVI съезд КПСС еще раз подчеркнул, как важно и необходимо для нашей страны продолжать разработку новых полупроводниковых приборов и развивать их производство на основе новых, еще более совершенных материалов.

Для того чтобы понять, как работают основные элементы современной электроники, необходимо сначала изучить принципы действия простейших полупроводниковых диодов и транзисторов. А для этого необходимо разобраться, каким образом металлы и полупроводники проводят электрический ток и почему изоляторы его практически не проводят.

§ 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ

«Беспризорные» электроны мечутся внутри металла. Как заставить их двигаться в заданном направлении?

Мы входим в комнату, нажимаем на клавишу выключателя и зажигаем электрическую лампу, висящую над столом. Что же происходит в столь привычной нам ситуации? Вы скажете: «Это совсем просто! Замкнулась цепь электрического тока. Ток течет по нити лампы, нагревает ее, и лампа светится». Ваш ответ правилен, однако без разъяснения термина «электрический ток» он не понятен.

Раскроем учебник физики. Там написано, что электрическим током называют упорядоченное (направленное) движение электрических зарядов. Новая загадка! Что же такое электрический заряд? Наша цепочка вопросов возникла вполне закономерно, однако мы ухватились за нее не с того конца. В действительности изучение электрических явлений началось с того момента, когда обнаружилось, что при определенных условиях два тела, например два легких бумажных шарика, подвешенных на шелковых нитях, взаимно притягиваются или отталкиваются друг от друга. Отталкивание наблюдается, например, если сначала натирать шерстяной тряпочкой эбонитовую палочку, а затем коснуться этой палочкой сначала одного шарика, а затем другого.

Для того чтобы объяснить это явление и многие другие, в науку было введено понятие об электрическом заряде — некоторой порции электричества, имеющей либо положительный, либо отрицательный знак.

Опыты показали, что одноименные заряды отталкиваются, а разноименные — притягиваются друг к другу (рис. 2).



Рис. 2

Не будем здесь излагать многочисленные дальнейшие опыты, которые подтвердили, что представление о существовании положительных и отрицательных электрических зарядов позволяет правильно истолковать результаты многих наблюдений. Ученые научились измерять электрические заряды и пока не обнаружили в природе существования порции заряда меньшей чем $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Единица электрического заряда носит имя французского физика Кулона. Заряд, равный минус $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, имеет элементарная частица, названная электроном. Зарядом плюс $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл обладают элементарные частицы позитрон и протон.

Опыты показали, что любые заряды всегда кратны элементарному заряду, либо положительному, либо отрицательному (рис. 3).

Итак, сначала были обнаружены электрические заряды, а уж затем начали изучать их движение и сопутст-

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЗАРЯДЫ



ЭЛЕКТРОН



ПОЗИТРОН

ЗАРЯДЫ БОЛЬШЕ ЭЛЕМЕНТАРНОГО

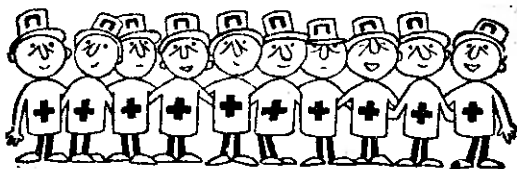
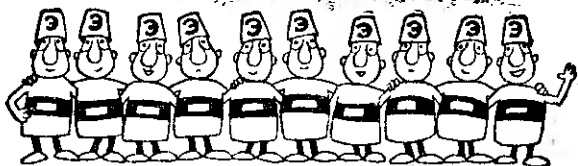


Рис. 3

вующие этому движению явления. Направленное движение заряженных частиц называли электрическим током.

Ток, текущий через лампочку карманного фонаря, в который вставлена батарейка, не меняется ни по величине, ни по направлению, поэтому такой ток называют постоянным.

Металлическая нить лампочки имеет кристаллическую структуру и состоит из положительно заряженных частиц — ионов, между которыми двигаются электроны. Ион — это атом, потерявший хотя бы один электрон. Вы, конечно, знаете, что каждый атом вещества состоит из положительно заряженного ядра и окружающих это ядро электронов. Суммарный заряд всех электронов равен по абсолютной величине заряду ядра. Поэтому полный заряд атома равен нулю — атом нейтрален. Итак, кристаллическая решетка металла состоит из «крепко сцепившихся между собой» ионов.

Ионы решетки заряжены одноименным зарядом и, казалось бы, должны отталкиваться друг от друга. Как же образуется решетка? Здесь дело в том, что между ионами действуют не только электрические силы отталкивания, но и силы иной, не электрической природы. Эти силы и удерживают ионы, в результате чего образуется кристаллическая решетка.

«Сцепившиеся» ионы, составляющие кристаллическую решетку, не могут перемещаться по металлу и поэтому не способны образовать направленное движение электрических зарядов — электрический ток.

Конечно, ионы не стоят, как вкопанные, в узлах кристаллической решетки. Они, как бы «приплясывают» на месте тем сильнее, чем выше температура металла. Такое движение присуще атомам любого вещества. Оно называется **тепловым**. Притрагиваясь к нагретому телу, мы фактически ощущаем пальцами это движение.

Тепловое движение ионов в металле не образует электрического тока, но существенно влияет на движение оторвавшихся от атомов электронов. А именно это движение электронов, называемых **с в о б о д н ы м и**, и образует электрический ток.

Почему оторвавшиеся от атомов электроны в металле называются свободными? Дело в том, что эти электроны «забывают свой атом» и свободно перемещаются между ионами кристаллической решетки металла. Их движение

весьма схоже с движением молекул газа, заключенного в сосуд. Поэтому иногда свободные электроны в металле называют «электронным газом».

Для того чтобы свободные электроны образовали электрический ток, надо заставить их двигаться преимущественно в одну сторону. Эту функцию берет на себя батарейка карманного фонаря. Она заставляет электроны «убегать» от отрицательного полюса к положительному; при этом положительный полюс «проглатывает» прибегающие к нему электроны, а отрицательный полюс «выбрасывает» электроны в провод, соединяющий батарейку с лампочкой.

Батарейка, которую называют источником электродвижущей силы, способна выполнять эту работу, потому что внутри ее происходит химическая реакция. Результатом реакции является разделение положительных и отрицательных зарядов, т. е. преодоление электрических сил взаимного притяжения этих зарядов. Когда запасы веществ, участвующих в химической реакции внутри батарейки, исчерпываются, лампочка фонаря постепенно гаснет.

Итак, в металле электрический ток образуется свободными электронами. Если нет никаких внешних причин, заставляющих электроны двигаться в одном направлении, то электроны перемещаются во всевозможные стороны, натыкаясь на ионы кристалла, друг на друга и непрерывно меняя направление движения. В металле царит хаос и в среднем число электронов, движущихся навстречу друг другу, одинаково. Такое движение электронов, как и «дрожание» ионов, также является тепловым. Чем выше температура металла, тем в среднем быстрее движутся электроны и сильнее «дрожат» ионы.



Рис. 4

На рисунке 4 мы изобразили расположение электронов (представляя их в виде бегущих человечков) в произвольно выбранный момент времени. Стрелки показывают направления движения электронов. Длина стрелок пропорциональна скорости движения электронов.

Вы видите на рисунке стрелки различной длины, так как скорости электронов не одинаковы ни по модулю, ни по направлению. Тем не менее при заданной температуре металла можно найти среднюю скорость электронов, если сложить длины всех стрелок, не учитывая их направления, и разделить на число электронов. При комнатной температуре эта средняя скорость равна примерно 10^7 см/с. Обратите внимание на это число — электроны движутся очень быстро!

Теперь сложим скорости всех электронов, учитывая направление скоростей. Для того чтобы это сделать, надо знать, как складываются два вектора, так как скорость — величина векторная. Правило сложения векторов, называемое правилом параллелограмма, легко понять, посмотрев на рисунок 5.

Сложив поочередно все скорости электронов металла (как векторы!), мы получим очень небольшую суммарную скорость, много меньшую, чем средняя скорость электронов. Повторяя эту операцию для разных моментов времени, мы сможем убедиться в том, что суммарная скорость электронов принимает всевозможные случайные направления и остается настолько малой, что ее можно считать равной нулю. Итак, суммарная скорость электронов, совершающих в металле тепловое движение, в среднем равна нулю. Малые отклонения этой скорости от нуля можно рассматривать как направленное перемещение зарядов, т. е. как электрический ток. Однако величина и направление этого тока хаотически меняются. Такой ток называют флуктуационным. Флуктуации тока в проводниках являются одной из причин шумов, возникающих в электронной аппаратуре.



Рис. 5

Для получения не флуктуационного тока надо к хаотическому движению электронов (от него нельзя избавиться!) прибавить направленное движение. Такое движение можно создать, если подействовать на все электроны с силой заданного направления, т.е. создать в металле электрическое поле. В примере, с которого мы начали, в электрической цепи карманного фонаря электрическое поле создается батареей — источником электродвижущей силы. Теперь к каждой стрелке O надо прибавить стрелку — вектор H , совпадающую с направлением силы. На рисунке 6 это показано для пяти электронов. Здесь стрелки O соответствуют скоростям электронов при отключении батарейки. Стрелки Σ , полученные сложением (по правилу параллелограмма) скоростей H и O , показывают скорости электронов при включении батарейки. Ясно, что если сложить скорости всех электронов и определить среднюю скорость, то она окажется примерно равной H . Направление H противоположно направлению электрического тока, так как электроны имеют отрицательный заряд, а за направление тока выбирается направление движения положительных зарядов.

§ 2. ЗАКОН ОМА

Электроны в цепи постоянного тока падают, как парашютисты, не нарушая второго закона Ньютона

Как должно двигаться тело, на которое действует постоянная сила? Ответ: тело под действием постоянной силы движется равноускоренно. Этого требует один из

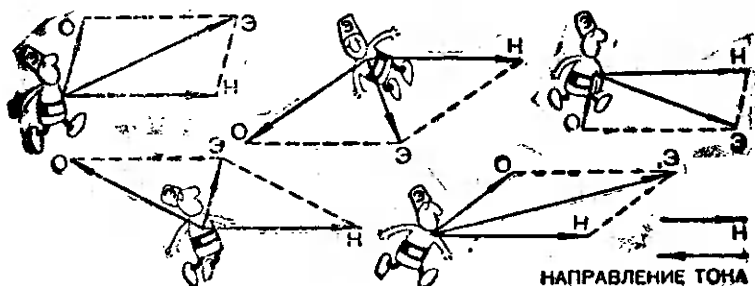


Рис. 6

основных законов механики — второй закон Ньютона. Как же должны двигаться свободные электроны в металле, если на них действует с постоянной силой электрическое поле? Не спешите с ответом. Электроны движутся с постоянной средней скоростью, причем легко убедиться, что эта скорость пропорциональна напряженности электрического поля, т. е. действующей силе. Именно этот факт выражается законом Ома, который в школьном учебнике для IX класса формулируется так: для однородной цепи сила тока прямо пропорциональна приложенному напряжению.

Вспомним, что сила тока в проводнике определяется зарядом, прошедшим через поперечное сечение проводника за единицу времени. Так, если сила тока равна 1 А, то через сечение проводника за 1 с проходит $6,2 \cdot 10^{18}$ электронов. Ясно, что сила тока прямо пропорциональна средней скорости движения электронов. Приложенное напряжение, в свою очередь, пропорционально напряженности электрического поля, т. е. силе, действующей на электроны.

В чем же кажущееся противоречие между законом Ома и вторым законом Ньютона? Оно вызвано тем, что мы забыли о непрерывных столкновениях электронов с ионами кристаллической решетки. Разогнавшийся в электрическом поле электрон при столкновении с ионом теряет приобретенную кинетическую энергию и вновь разгоняется. Таким образом, столкновения с ионами создают сопротивление электрическому току. Вот почему средняя скорость электронов, несмотря на ускорение их электрическим полем, остается постоянной.

Здесь есть некоторая

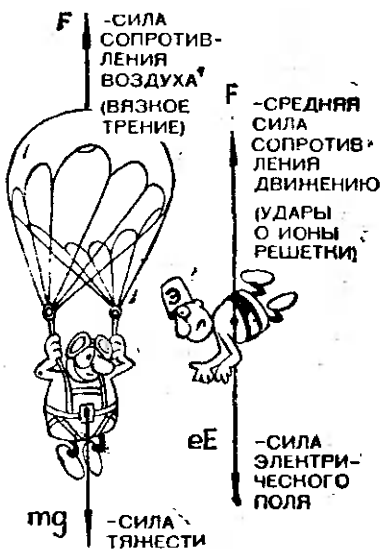


Рис. 7

аналогия с падением парашютиста. Хотя на него и действует сила тяжести, он падает с постоянной скоростью, так как сопротивление воздуха компенсирует действие силы тяжести (рис. 7).

Теперь уместно привести несколько цифр. Среднее время между двумя столкновениями электрона с ионами решетки очень мало. В меди оно не превышает, например, $3 \cdot 10^{-14}$ с. Какой же путь проходит электрон за это время? Умножая приведенную выше среднюю скорость электрона 10^7 см/с на $3 \cdot 10^{-14}$ с, мы получим $3 \cdot 10^{-7}$ см. Мало ли это расстояние? С чем его разумно сравнить? Его надо сравнить с расстоянием между ионами кристаллической решетки, которое примерно равно $3 \cdot 10^{-8}$ см.

Не кажется ли вам странным полученный результат? Электрон «проявляет удивительную ловкость», пробегая мимо девяти притягивающих его ионов, и сталкивается в среднем только с каждым десятым (рис. 8)!

Вы вправе удивляться. В самом деле, объяснить такое движение, основываясь лишь на законах классической физики, нельзя. Мы здесь впервые сталкиваемся с тем обстоятельством, что такие фундаментальные законы, как законы Ньютона, закон Кулона, закон Ома, еще недостаточны для полного описания наблюдаемых явлений. Мы должны сделать вывод о том, что эти законы классической физики характеризуют поведение электрона в металле лишь приближенно. Более точный расчет движения электронов в металле стал возможен лишь с развитием на заре XX в. квантовой физики. В этой книге мы еще на

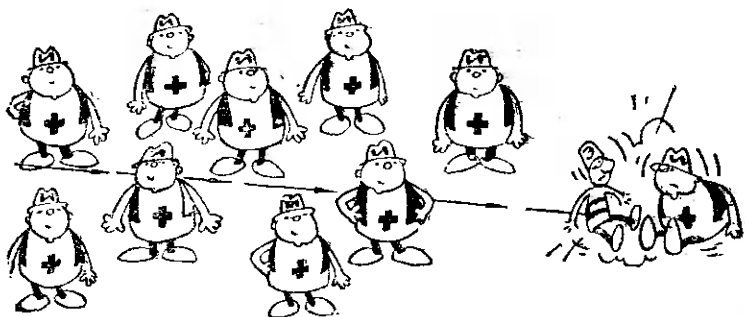


Рис. 8



Рис. 9

раз столкнемся с необходимостью принять на веру закономерности, раскрыть которые способна только квантовая физика.

Однако не спешите отбрасывать как «устаревшие» законы классической физики. Многие и очень многие опытные факты они описывают с такой высокой точностью, что применять в этих случаях квантовые законы было бы совершенно неразумно.

Итак, направленному движению электронов мешают «скачущиеся» тяжелые и большие ионы. Это и создает сопротивление движению электронов — вызывает электрическое сопротивление металла. Если металл нагревать, то «пляска» ионов становится все более бурной и они сильнее мешают двигаться электронам (рис. 9), поэтому электрическое сопротивление металла при его нагревании увеличивается!

Подведем краткий итог.

Металлы хорошо проводят электрический ток, так как уже при комнатной температуре в них имеется большое количество (например, в меди $3,1 \cdot 10^{22}$ электронов на 1 см^3) свободных электронов. Электроны являются носителями электрического заряда в металле. Движению свободных электронов в металле мешают ионы кристаллической решетки и тем больше, чем выше температура металла. Поэтому электропроводимость металла с повышением температуры уменьшается.

Такова простейшая модель, поясняющая протекание тока через металл.

Что такое хорошо и что такое плохо?

Обратите внимание на то, как подвешены провода высоковольтной линии электропередачи. Они висят высоко над землей на гирляндах из фарфоровых или стеклянных изоляторов. Провода электросети в дачном поселке или деревне также прикреплены к фарфоровым изоляторам. Изоляторы надеты на крючки, привинченные к деревянным или железобетонным столбам с табличкой «не влезай — убьешь!» Посмотрите внимательно на провода троллейбусной или трамвайной линии — они также висят на изоляторах. Провода, подводящие ток к настольной лампе, изолированы пластмассовой или резиновой оболочкой.

Во всех перечисленных примерах мы употребили привычное слово — изолятор. Давайте теперь уточним, что же следует понимать под этим словом. Изолятором называют вещество, очень плохо проводящее электрический ток. Вы удовлетворены этой формулировкой? Конечно, нет, потому что остается неясным, какую электропроводимость следует считать очень плохой (слабой).

В физике любая количественная характеристика должна даваться в сравнении с другими. Поэтому для выделения класса веществ, называемых изоляторами, давайте сравним их электрическое сопротивление с хорошо известным сопротивлением металлов, например меди, из которой обычно изготавливают электрические провода. Так вот, сопротивление изоляторов при прочих равных условиях превышает сопротивление металлов примерно от $1\,000\,000\,000\,000 = 10^{12}$ до 10^{18} раз. Такое огромное различие трудно себе представить. Именно оно позволяет нам безбоязненно прикасаться, например, к ручкам настройки телевизора или садиться в вагон электрички.

Итак, в природе существуют металлы — очень хорошие проводники электрического тока (по сравнению с изоляторами) и изоляторы — очень плохие проводники электрического тока (по сравнению с металлами). А есть ли вещества, занимающие по способности проводить электрический ток промежуточное между металлами и изоляторами место? Да, есть. Эти вещества называются полупроводниками. К ним относятся, например, герма-

ний, кремний, многочисленные их соединения, оксиды металлов.

Интенсивное изучение полупроводников началось в начале XX в. Один из первых экспериментальных результатов, который трудно было в то время понять и объяснить, состоял в том, что, в отличие от

металлов, электрическое сопротивление полупроводников с ростом температуры уменьшается.

Вы можете сами проделать следующий опыт. Для него потребуется круглая батарейка от карманного фонаря, дающая напряжение 1,5 В, миллиамперметр со шкалой 1 мА и полупроводниковое термосопротивление — терморезистор, например, типа ММТ-1 или подобный, имеющий при комнатной температуре сопротивление, равное нескольким тысячам Ом.

Составьте электрическую цепь, изображенную на рисунке 10. Зажмите терморезистор пальцем. Вы заметите, что ток в цепи начинает увеличиваться. Даже небольшой разогрев терморезистора рукой достаточен для уменьшения его сопротивления.

Проведенный нами опыт подтверждает, что электрическое сопротивление полупроводникового вещества, в отличие от сопротивления металла, при нагревании уменьшается. Это значит, что принятая нами в предыдущем параграфе модель движения электрических зарядов в металлах не может быть непосредственно применена к полупроводникам.

Для объяснения свойств электропроводимости полупроводников надо эту модель «исправить» и дополнить. Такая, усовершенствованная модель к настоящему времени уже построена, и мы с ней познакомимся дальше.

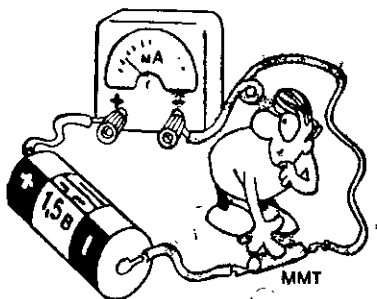


Рис. 10

§ 4. ЭФФЕКТ ХОЛЛА

Как магнитное поле помогает разгадать знак движущегося заряда?

Вернемся в привычную нам область комнатных температур и ознакомимся еще с одним интересным отличием полупроводников от металлов.

Это отличие состоит в том, что в полупроводниках можно обнаружить электрический ток, образованный как бы движением положительных зарядов, тогда как в металлах ток образуется только отрицательными частицами — электронами.

Прежде чем выяснить, что это за положительные заряды, опишем опыт, который позволяет определить знаки зарядов, образующих электрический ток. Этот опыт был впервые проведен американским физиком Холлом, и поэтому обнаруженный в результате эффект называют эффектом Холла.

Пусть кусок вещества, в котором нужно определить знаки движущихся зарядов, имеет форму бруска — параллелепипеда. Как показано на рисунке 11, брусок снабжен четырьмя электродами — электрическими контактами, к которым можно подсоединить провода. Воспользуемся контактами и соберем две замкнутые электрические цепи. В первичной цепи течет постоянный ток, так как эта цепь содержит батарейку или другой источник электродвижущей силы. Если этот первичный ток переносится положительными зарядами, то они отталкиваются от положительного полюса батареи и двигаются к отрицательному; если же первичный ток создается отрицательными зарядами, то они двигаются в обратную сторону. Направление первичного тока фиксирует включенный в цепь амперметр.

На рисунке 11 показано, что брусок вещества помещен между полюсами постоянного магнита. Вспомните, что происходит с проводником, по которому течет ток, если его поместить в магнитное поле. Он начинает двигаться, если только силовые линии магнитного поля не параллельны проводнику и проводник не закреплен. На этом эффекте основано действие электродвигателей. Проводник в магнитном поле смещается потому, что силы дей-

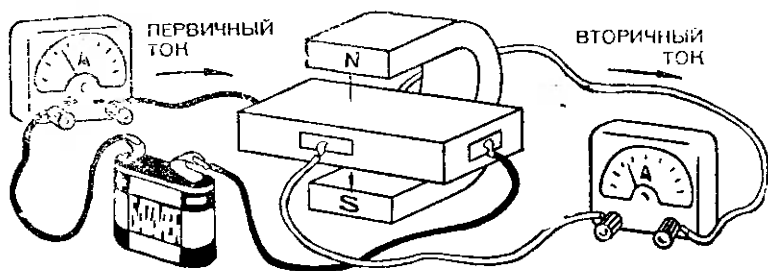


Рис. 11

ствуют на движущиеся в нем заряды. Эти силы называют силами Лоренца.

Итак, на заряды, движущиеся в бруске, действуют силы Лоренца, стремящиеся отклонить эти заряды в сторону. В какую же сторону будут отклоняться движущиеся положительные заряды? Вам знакомо правило «левой руки», которое позволяет ответить на такой вопрос. Вспомним это правило. Если ладонь левой руки поместить между полюсами магнита так, чтобы в нее входили силовые линии магнитного поля, а вытянутые пальцы расположить по направлению тока, как это показано на рисунке 12, то отогнутый большой палец покажет направление отклонения проводника с током, т. е. направление силы Лоренца.

Правило «левой руки» служит людям уже много лет и в полезности его сомневаться не следует. Тем не менее нам хочется здесь познакомить вас с другим, более универсальным правилом, которое в физике и технике применяется значительно чаще правила «левой руки». Согласитесь, что легко забыть, какой рукой надо пользоваться, определяя направление движения проводника, — правой или левой. Если же перепутать руки и воспользо-

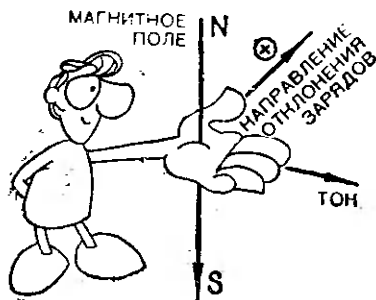


Рис. 12

ваться правой рукой вместо левой, то найденное направление движения проводника будет противоположным действительному. Поэтому мы предлагаем вам запомнить другое правило — правило правого винта или буравчика.

Общепринятым стандартом в технике являются болты (винты) и гайки с так называемой правой резьбой. Левая резьба применяется очень редко, лишь в тех случаях, когда это обусловлено особенностями конструкции или функциями, выполняемыми механизмом. Если шляпку правого винта или рукоятку буравчика поворачивать по часовой стрелке, то винт или буравчик ввинчивается, т. е. отодвигается, от руки или отвертки. Такое движение винта с правой резьбой настолько привычно людям, занимающимся техникой, что перепутать или забыть, куда движется винт при вращении его головки, просто невозможно.

Конечно же, настоящий физик знает свойства правого винта не хуже любого техника. Вот почему очень удобно воспользоваться правилом правого винта, или, как чаще говорят, правилом буравчика, для определения направления движения проводника с током в магнитном поле. Для этого надо повернуть рукоятку буравчика от направления тока (движения положительных зарядов) по кратчайшему пути к направлению силовых линий магнитного поля. Эти линии выходят, как вы знаете, из северного полюса магнита N и входят в южный полюс S . На рисунке 13 показан пример, когда такой поворот происходит по направлению движения часовой стрелки. Значит, буравчик ввинчивается и отодвигается от руки. Это движение буравчика и показывает, куда отклоняется проводник с током. Результат естественно совпадает с полученным по правилу «левой руки».



Рис. 13

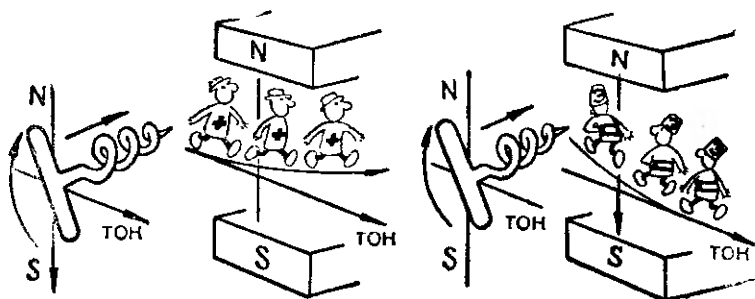


Рис. 14

Применяя правило буравчика, легко убедиться, что в нашем опыте положительные заряды, вместо того чтобы двигаться прямо, смещаются к задней грани бруска (рис. 14). А если ток переносится отрицательными зарядами? Не надо забывать, что в этом случае изменяется и направление движения зарядов (при заданном направлении тока) и знак зарядов. Поэтому отрицательные заряды отклоняются также к задней грани бруска. Часть зарядов отклоняется настолько сильно, что попадает на электроды боковых граней и выходит из бруска во вторичную цепь. В результате в этой цепи образуется вторичный ток.

Постарайтесь теперь ответить на вопрос: какое направление будет иметь вторичный ток? Если в первичной цепи двигаются положительные заряды, то они, выходя через заднюю грань, создают во вторичной цепи ток, направление которого показано на рисунке 11. Если же в первичной цепи движутся отрицательные заряды, то они также выходят через заднюю грань, т. е. перемещаются в ту же сторону, что и положительные, а это значит, что создается вторичный ток обратного направления.

Следовательно, определяя по отклонению стрелки амперметра во вторичной цепи направление вторичного тока, мы однозначно можем сказать, какого знака те заряды, которые создают первичный ток. При проведении этого опыта с брусками из полупроводниковых материалов был получен неожиданный результат. Во многих случаях из опыта следовало, что движущиеся в бруске заряды положительны. Как же объяснить этот эксперимен-

тальный факт? Ведь свободных положительных зарядов в веществе как будто бы нет! Положительно заряженные ионы кристаллической решетки твердого вещества не могут перемещаться. Отрываться от атомов решетки могут только электроны.

В металлах именно это и наблюдается. Откуда же берутся движущиеся положительные заряды в полупроводниках?

§ 5. ЗОННАЯ МОДЕЛЬ ВЕЩЕСТВА

Что запрещено и что разрешено электронам в кристалле?

Для ответа на поставленный вопрос нам придется познакомиться с несколько необычной на первый взгляд моделью вещества. Начнем с модели отдельного атома. Мы уже отмечали, что электроны отрываются от атомов, в результате чего образуются положительные ионы и свободные электроны. Как же располагаются электроны в атоме до отрыва?

Возьмем в качестве примера полупроводник германий (Ge). Каждый атом германия содержит 32 электрона. Они расположены вокруг ядра как бы на четырех оболочках: 2 электрона — на внутренней оболочке, 8 — на второй, 18 — на третьей и, наконец, 4 — на внешней (рис. 15).

Атом другого полупроводника, широко используемого для изготовления приборов, кремния (Si) содержит 14 электронов, причем из них 2 электрона на внутренней оболочке, 8 — на второй и 4 — на внешней.

На внешнюю оболочку, называемую валентной, нам следует обратить особое внимание. Дело в том, что только валентные электроны способны при обычных условиях отрываться

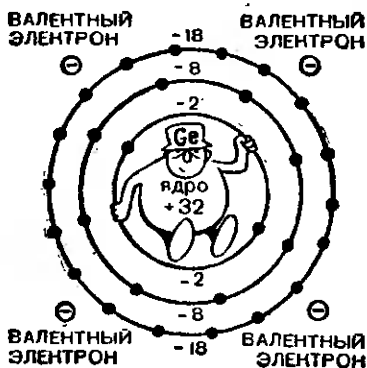


Рис. 15

ся от ядра. Только они могут стать свободными и выполнить роль носителей зарядов, образующих ток. Поэтому забудем про остальные 28 электронов атома германия и припишем каждому иону решетки 4 валентных электрона. При рассмотрении модели атома германия (кстати, эта модель весьма груба, так как не отражает движения электронов вокруг ядра, не говоря уже о многих других фактах) может показаться, что валентные электроны в атоме ничем друг от друга не отличаются. Однако это не так. Валентные электроны в атоме отличаются друг от друга тем, что для их отрыва от ядра надо затратить разную энергию.

Представим себе такую ситуацию. Пусть, для того чтобы стать свободным, валентному электрону надо «взобраться по отвесной стене» на верхнюю горизонтальную площадку, как это изображено на рисунке 16. Ниже мы будем для краткости говорить, что «электрон взбирается на обрыв». Очевидно, что легче всего «вскочить на обрыв» с верхней ступеньки лестницы. Где же располагаются электроны? Оказывается, что на верхней ступеньке находится не более двух электронов. Остальные, причем тоже по два, могут располагаться только на других, более низких ступеньках. Вот этим расположением и различаются валентные электроны атома. Переходя со ступеньки на ступеньку вверх, электрон совершает работу, затрачивая на нее энергию, и поэтому его энергетическое состояние меняется. Каждая ступенька соответствует определенному уровню энергии электрона. Таким образом мы приходим к модели, показывающей расположение электронов на энергетических уровнях.

Подчеркнем еще раз, что на каждом энергетическом уровне может располагаться не более двух электронов. Это важное правило получило название принципа Паули.

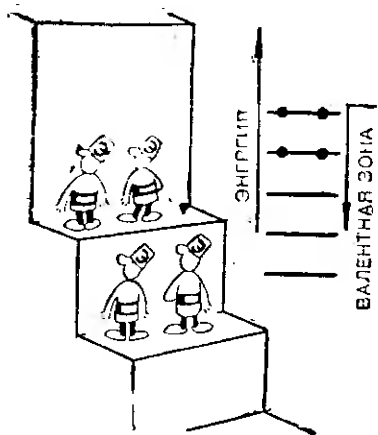


Рис. 16

Ступеньки модели энергетических уровней мы изобразили черточками, а электроны — точками. Возникает вопрос: почему подступам к обрыву мы придали форму ступенек, а не нарисовали их плавно спадающим склоном, по которому электроны могли бы «вползать» словно муравьи? На этот вопрос в рамках классической физики ответить невозможно. Опыт, экспериментальные наблюдения множества явлений показали, что такое представление, такая модель не верны. А именно опыт является высшим критерием правильности построенных нами моделей. Математическое описание модели энергетических ступенек можно найти лишь в квантовой физике.

Итак, существуют только отдельные разрешенные энергетические уровни, на которых дозволено располагаться электронам в атоме, причем на каждом уровне не может находиться одновременно более двух электронов.

А что происходит в кристаллах германия или кремния, состоящих из огромного числа одинаковых атомов? Оказывается, что при образовании кристаллической решетки (вспомните «держашшие друг друга за руки» ионы металла) дозволенные ступеньки расширяться никак не могут — на каждой из них по-прежнему располагается не более двух электронов. Это строгое правило сохраняется и для ансамбля взаимодействующих атомов (они «держатся за руки»), образующих кристалл. Отсюда следует, что в кристалле мы должны каждую ступеньку для отдельного атома раздробить на число разновысоких ступенек, равное числу атомов в кристалле (рис. 17). Чтобы не загромождать рисунок, мы нарисовали картину только для двух взаимодействующих атомов и их восьми валентных электронов.

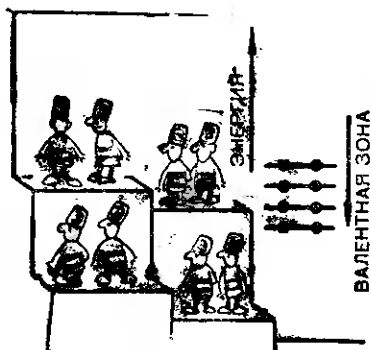


Рис. 17

Набор всех разрешенных энергетических уровней валентных электронов, связанных с атомами в кристаллической решетке, составляет целую полосу, которую называют валентной зоной.

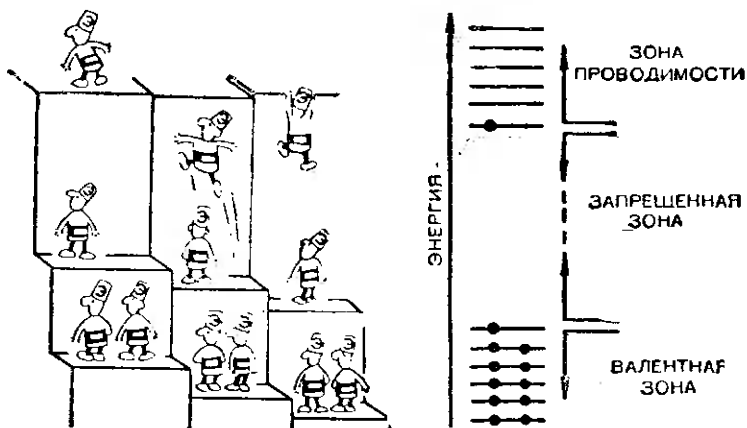


Рис. 18

Мы представили себе отрыв электрона от атома, или, лучше сказать, от системы связанных ионов кристаллической решетки, как «прыжок вверх на обрыв». Этот «обрыв» в металлах оказывается не высоким или вовсе отсутствует. Поэтому валентные электроны металла, «оживленно суетясь», совершая тепловое движение, легко «вскакивают на обрыв», или, как говорят, переходят в другую зону энергетических уровней — зону проводимости. Практически все валентные электроны металла отрываются от атомов и уже «не помнят», какому атому они когда-то принадлежали. Они свободны и, перемещаясь, образуют электрический ток, т. е. обуславливают электрическую проводимость. Отсюда и название зоны — зона проводимости.

Совсем другая картина имеет место в полупроводниках и изоляторах. В них электроны для перехода из валентной зоны в зону проводимости должны «высоко подпрыгнуть». На это способны не все электроны, а лишь «наиболее оживленные». Высота «обрыва», разделяющего верхнюю ступеньку валентной зоны и нижнюю ступеньку зоны проводимости, составляет целую полосу энергетических уровней, на которых электронам не дозволено находиться. Эта область носит название зоны запрещенных энергетических состояний или просто за п р е щ е н н о й з о н ы. «Высота обрыва» определяет ширину запрещенной зоны (рис. 18).

Именно ширина запрещенной зоны является основным критерием, по которому следует разделять вещества на металлы (проводники), полупроводники и изоляторы. В металлах ширина запрещенной зоны очень мала или эта зона не существует вовсе, так что практически все электроны покидают валентную зону и находятся в зоне проводимости. В изоляторах ширина запрещенной зоны настолько велика, что при обычных комнатных температурах число электронов, способных перейти в зону проводимости («выпрыгнуть на вершину обрыва»), весьма мало. Электроны изолятора связаны с атомами кристаллической решетки и не способны передвигаться. Поэтому электрический ток в изоляторе ничтожно мал. В полупроводниках запрещенная зона существует, но она не столь широка, как в изоляторе, и поэтому при комнатных температурах уже заметное число валентных электронов «перепрыгивает» в зону проводимости.

Мы несколько раз уже повторяли слова «при комнатной температуре». Давайте разберемся более детально в той роли, которую играет температура в процессе отрыва электронов от атомов германия. Вы уже знаете, что существует нижняя граница температуры — абсолютный нуль. По простым представлениям при абсолютном нуле должно прекратиться всякое тепловое движение атомов. Остановиться должны и электроны. Это значит, что ни один валентный электрон не сможет оторваться от атома, так как у него «нет силы вскочить на обрыв» — перескочить запрещенную зону. Лучше сказать, что нет источника энергии,



Рис. 19

необходимой для отрыва электрона. Значит, при абсолютном нуле электроны должны заполнить все имеющиеся уровни валентной зоны и «спокойно сидеть» на ее ступеньках (рис. 19).

Как изменяется энергия электронов при нагревании вещества, т. е. при увеличении средней скорости теплового движения атомов? Мы не бу-

дем писать здесь математическую формулу, показывающую эту зависимость, а постараемся проиллюстрировать ее примером.

Отвлечемся на некоторое время от атома и обратимся к распределению молекул газа в атмосфере Земли по высоте. Вы хорошо знаете, что атмосфера наиболее плотна у поверхности Земли. С высотой плотность атмосферы уменьшается, в результате чего небо приобретает все более фиолетовый оттенок, а затем становится совсем черным. При подъеме на высокую гору альпинистам становится все труднее дышать. Летчики на самолетах без герметических кабин надевают кислородные приборы. На высоте движения искусственных спутников Земли и космической станции «Салют», т. е. на высоте примерно 200 км и выше, плотность атмосферы уже ничтожно мала.

Постараемся теперь понять, в чем причина изменения плотности атмосферы с высотой. При этом для упрощения задачи мы не будем учитывать то обстоятельство, что атмосфера Земли состоит из смеси различных газов (кислорода, азота, гелия и других), а будем говорить о газе, составляющем атмосферу, считая все молекулы этого газа одинаковыми.

Для выяснения причины изменения плотности атмосферы с высотой надо учесть два обстоятельства. Во-первых, молекулы газа совершают беспорядочное тепловое движение и по этой причине стремятся занять весь объем предоставленного газу сосуда. Для атмосферы Земли таким «сосудом» является космическое пространство, и поэтому молекулы атмосферы, совершая тепловое движение, стремятся оторваться от Земли. Во-вторых, эти молекулы обладают массой и на них действует сила притяжения со стороны Земли. Под действием этой силы молекулы газа стремятся «упасть» на поверхность Земли. Этого не происходит по той причине, что есть первое обстоятельство — тепловое движение молекул.

Итак, мы видим, что, с одной стороны, есть причина, по которой молекулы газа должны покинуть Землю, и, с другой стороны, есть причина, по которой они должны «упасть» на Землю. Вот мы и подошли к ответу на поставленный вопрос о распределении молекул атмосферы Земли по высоте. Для правильного ответа на этот вопрос надо одновременно учесть два противоборствующих явления — стремление молекул газа покинуть Землю и упасть

на нее. Эту задачу математически решил известный австрийский физик, один из основоположников статистической физики и термодинамики — Людвиг Больцман. Он показал, что плотность атмосферы, если, конечно, не учитывать множество побочных явлений, должна убывать с ростом высоты по экспоненциальному закону, как это показано графически на рисунке 20. Такое распределение получило название **распределения Больцмана**.

Подчеркнем самое главное: закон распределения Больцмана зависит от температуры газа. Действительно, чем выше температура, тем интенсивнее тепловое движение. Это значит, что если по какой-либо, пусть фантастической, причине атмосфера Земли внезапно сильно нагреется, то плотность ее на высоте полета станции «Салют» может оказаться значительно большей, чем в настоящее время, и наоборот, если по другой не менее фантастической причине температура приблизится к абсолютному нулю, то атмосфера Земли (если бы она при этом осталась газообразной!) фактически «упадет» на Землю.

Теперь следует сказать, что мы выбрали задачу о распределении плотности атмосферы Земли по высоте лишь как наглядный пример, иллюстрирующий характер распределения Больцмана. На самом деле с таким законом распределения физики встречаются во множестве других задач. В частности, с некоторыми несущественными для нас сейчас оговорками, распределение электронов по уровням энергетических зон в

равновесии соответствует закону распределения Больцмана. Нетрудно понять, что этот факт не случаен, так как при распределении электронов по уровням также действуют два фактора — притяжение электронов ядрами атомов и тепловое движение электронов. Надо только учесть, что по законам квантовой механики электронам дозволено занимать лишь определенные



Рис. 20

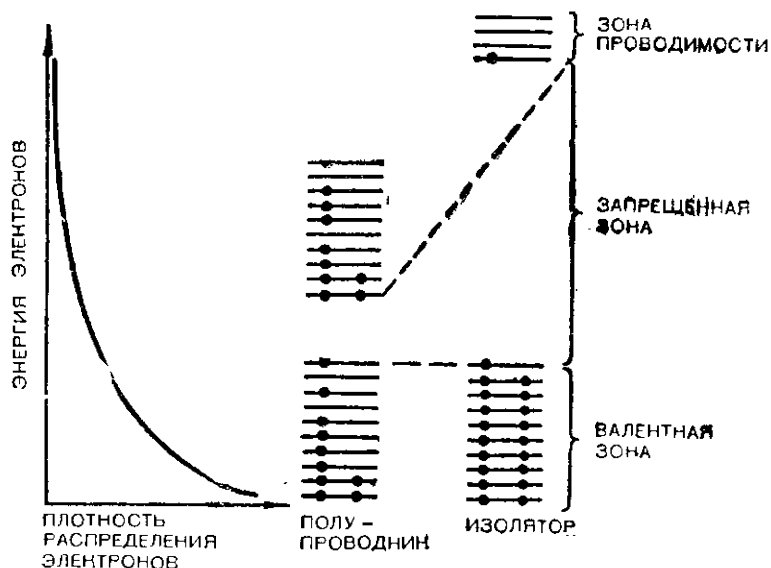


Рис. 21

(дискретные) уровни энергии и что существуют целые зоны уровней, где электронам вовсе запрещено находиться, — запрещенные зоны.

После всего сказанного построим следующую диаграмму. Слева на рисунке 21 изобразим график распределения электронов по энергетическим уровням при комнатной температуре — распределение Больцмана. Справа, в том же масштабе изобразим зонные модели полупроводника и изолятора. Рисунок носит иллюстративный характер и не претендует на точность. Мы хотим лишь наглядно пояснить, почему при комнатной температуре изолятор оправдывает свое название.

Сопоставляя левую и правую части рисунка, нетрудно убедиться в том, что согласно распределению Больцмана при комнатной температуре лишь ничтожное количество электронов способно преодолеть широкую запрещенную зону изолятора. Поэтому изолятор и обладает огромным сопротивлением.

Теперь самое время вспомнить описанный в § 2 опыт, показавший, что при нагревании полупроводникового ве-

щества его электрическое сопротивление уменьшается и ток в цепи увеличивается. Зонная модель полупроводника и закон распределения Больцмана подтверждают, что так оно и должно быть. Ведь при нагревании вещества число электронов, способных преодолеть запрещенную зону и стать свободными, быстро увеличивается и они включаются в процесс образования электрического тока. В металлах же уменьшения сопротивления при нагревании заметить нельзя, напротив — оно растет! Это происходит по той причине, что в металлах при комнатной температуре и даже более низких температурах практически все валентные электроны уже свободны и при нагревании число свободных электронов не растет. Сопротивление металлов, как уже отмечалось выше, при нагревании увеличивается вследствие более интенсивного движения ионов решетки, с которыми электроны непрерывно сталкиваются.

Сильная зависимость сопротивления полупроводникового материала от температуры используется в приборах, получивших название термочувствительных резисторов — терморезисторов. О них речь будет ниже.

§ 6. ФОТОПРОВОДИМОСТЬ

Свет управляет электрическим сопротивлением

Как мы только что установили, для перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости необходима энергия. Оказывается, что источником этой энергии может быть не только тепловое движение электронов и ионов, но и освещение вещества. Для того, чтобы разобраться в этом процессе, надо вспомнить, каковы современные представления о свете.

Долгие годы шли ожесточенные споры о том, что собой представляет свет — волны, распространяющиеся в загадочном эфире, или частицы — корпускулы, летящие с большой скоростью и при попадании на сетчатку наших глаз воспринимаемые нами как свет. Теперь между сторонниками волновой и корпускулярной теорий света уже давно заключен прочный мир. Загадка разрешилась очень просто, если не считать, что для этого должна была родиться новая наука — квантовая механика. Обе стороны

оказались правы: свет — это электромагнитные волны, такие же, как радиоволны, только гораздо более короткие, и одновременно частицы, фотоны, в чем-то похожие на другие элементарные частицы, но в то же время обладающие неповторимыми свойствами. Так, например, неподвижный фотон не имеет массы.

Итак, своим примирением сторонники волновой и корпускулярной теорий света, как уже было сказано, обязаны квантовой механике, показавшей, что каждая из теорий — волновая или корпускулярная — в отдельности не дают полного представления о реальном процессе распространения света, что эти теории отнюдь не противоречивы и обе в одинаковой степени необходимы для познания природы света.

Нам, однако, здесь пора поставить точку, так как свет не является предметом данной книги и дальнейшее обсуждение природы света увело бы нас слишком далеко в сторону от разбираемых вопросов. Обратим внимание лишь на одну особенность света (как, впрочем, и любой другой электромагнитной волны) — его квантовую природу. Она проявляется в том, что свет переносит энергию лишь отдельными, строго отмеренными порциями, называемыми квантами. Каждый фотон света переносит один квант энергии, причем величина кванта зависит лишь от длины световой волны, т. е. от соответствующего волне цвета. Чем меньше частота, т. е. чем больше длина волны, тем меньше квант энергии. Так как по мере перехода от красного света по всем цветам радуги к фиолетовому длина световой волны уменьшается, то квант красного света меньше кванта зеленого и тем более синего света. Строгое соответствие между длиной световой волны и величиной соответствующих ей квантов как раз и является одним из проявлений единства волновой и корпускулярной природы света.

Среди цветов спектра видимого света длина волны красного цвета близка к максимальной (0,6 мкм), а кванты энергии соответственно самые маленькие. Оценка показывает, что, несмотря на это, такой квант энергии уже примерно в два раза превосходит энергию, которая нужна электрону в германии для перехода из валентной зоны в зону проводимости. Это значит, что если освещать кристалл германия светом, то можно ожидать следующий результат: фотоны, проникая в толщу кристалла и стал-

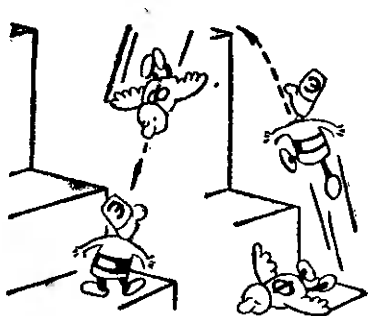


Рис. 22

киваясь с электронами, находящимися в валентной зоне, будут передавать им свою энергию. В результате электроны смогут оторваться от атомов и «перескочить» через запрещенную зону в зону проводимости (рис. 22). Попад в зону проводимости, электроны могут свободно участвовать в переносе заряда, т. е. создавать электрический ток. Поэтому при освещении кристалла гер-

мания его электрическое сопротивление должно уменьшаться точно так же, как это происходит при нагревании полупроводника. Явление увеличения проводимости полупроводника при освещении его светом получило название **фотопроводимости**.

Явление фотопроводимости используется для создания резисторов, сопротивление которых можно изменять, направляя на них луч света. Такие управляемые резисторы называются **фоторезисторами**. С их более подробным описанием вы встретитесь во второй главе книги. Здесь же нам осталось ответить еще только на один вопрос: какова судьба фотона, отдавшего свою энергию электрону? Этот фотон останавливается и перестает существовать, хотя мы и изобразили его лежащим после столкновения с электроном неподвижно на одной из ступенек валентной зоны.

§ 7. СОБСТВЕННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКА. ЭЛЕКТРОНЫ И ДЫРКИ

Можно ли почувствовать ложку дегтя в бочке меда?

Итак, зонная модель полупроводника имеет следующий вид: некоторое число электронов, на нашем рисунке — шесть, преодолело запрещенную зону и находится в зоне проводимости (рис. 23). Эти электроны, как и электроны металла, «забыли» свои атомы и являются сво-

бодными. Они способны передвигаться и создавать электрический ток. Однако в полупроводнике, в отличие от металла, значительная часть электронов осталась в валентной зоне. В валентной зоне появилось лишь некоторое число незаполненных уровней, которые раньше были заняты электронами, перешедшими в зону проводимости. Незаполненные уровни энергии в валентной зоне называются дырками.

Термин «hole» в буквальном переводе «отверстие», «дырка» был впервые введен в научной литературе на английском языке. Он прочно вошел в употребление и стал настолько привычным, что сейчас ни у кого не вызывает улыбки.

Какое движение электронов возможно в валентной зоне? Наличие дырок — свободных ступенек в валентной зоне — позволяет электронам переходить на эти ступеньки. Электрон при этом покидает одну связь между атомами и переходит на другую. А это значит, что освобождается место на ступеньке, которую покинул электрон, т. е. что дырки переместились из одного места в другое (рис. 24). Значит, в валентной зоне способны перемещаться дырки, имеющие

положительный заряд. Действительно, если недостает электрона в оболочке атома, то заряд всех электронов атома уже не может полностью скомпенсировать положительный заряд ядра. Итак, в валентной зоне способны перемещаться положительно заряженные дырки. Это и есть те самые положительные заряды, ко-

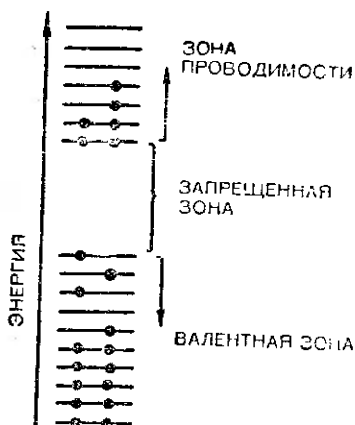


Рис. 23

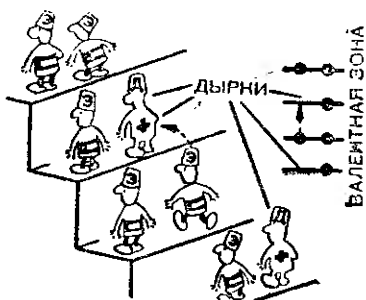


Рис. 24

которые обнаруживаются в опыте Холла с полупроводником.

На самом деле перемещаются в веществе все те же электроны. Но, когда мы имеем дело с вакантным местом в валентной зоне, т. е. дыркой, переход валентного электрона на это место аналогичен перемещению самого вакантного места — дырки — в противоположном направлении. В квантовой физике показывается, что такое движение валентных электронов действительно очень точно заменяется движением положительных дырок. Очевидно, что если все уровни валентной зоны свободны, т. е. она «всё в дырках», то говорить о перемещении этих дырок бессмысленно. Именно это и имеет место в металлах.

Изобразим теперь условно кристаллическую решетку полупроводника на примере германия (рис. 25). Условность рисунка состоит в том, что мы не отражаем на нем истинную объемную структуру решетки, а заменяем ее упрощенной плоской моделью. Однако главная особенность решетки германия на рисунке отображена, а именно черточками обозначены связи между ионами, т. е., образно говоря, «руки», которыми ионы решетки удерживаются на своих местах. Между каждой парой соседних ионов «протянуто по две руки», на каждой из которых

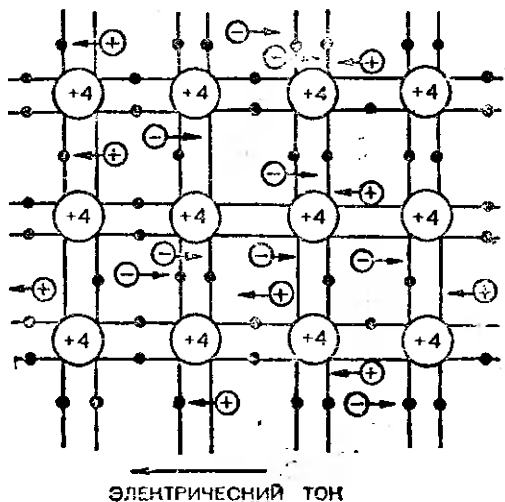


Рис. 25

может располагаться один валентный электрон, обозначенный на рисунке точкой. Заряд иона по числу валентных электронов мы положили равным $+4$ единицам. Остальной заряд ($+28$ единиц) скомпенсирован электронами на внутренних оболочках атома, и мы можем о нем забыть. Если «рука» потеряла валентный электрон, то на этом месте образуется дырка, обозначенная на рисунке знаком «плюс». Всего на рисунке показано девять дырок и соответственно девять оторвавшихся электронов, обозначенных знаками «минус».

Нарисованная картина предполагает, что кристалл состоит только из атомов германия, т. е. что он абсолютно чистый — не содержит никаких примесей. Такой кристалл называли собственным, а его проводимость — собственной или беспримесной. Очевидно, что в собственном кристалле число свободных электронов и дырок всегда одинаково — каждый отрыв электрона сопровождается образованием дырки. Поэтому электрический ток в собственном полупроводнике в равной степени образуется как положительными, так и отрицательными зарядами.

Как вы думаете, какой результат в этом случае покажет опыт Холла? Вспомните, как ставился этот опыт. Брусек полупроводникового материала, по которому течет первичный ток, помещается в магнитное поле. Если этот ток образуется одинаковым числом электронов и дырок (причем электроны и дырки отклоняются в магнитном поле в одну и ту же сторону в одинаковой степени), то ясно, что суммарный отклоненный заряд близок к нулю (рис. 26). Это значит, что никакого заметного вторичного тока мы в этом случае наблюдать не должны.

Тем не менее многочисленные опыты по схеме Холла показывают движение или только положительных или только отрицательных зарядов. В каких же полупроводниковых веществах это наблюдается? Это наблюдается только в полупроводниковых веществах, содержащих примеси чужеродных атомов. И эксперимент, и современная теория показывают, что весьма малое содержание примесей, например когда на 10 000 атомов полупроводника приходится лишь один «чужой» атом, изменяет способность полупроводника проводить электрический ток в десятки и сотни раз. Поэтому мы должны сейчас выяснить, какую роль играют атомы примеси в процессе образования электрической проводимости полупроводника.

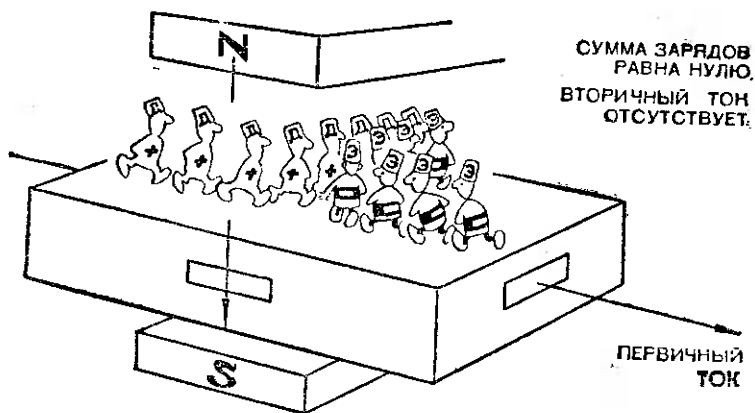


Рис. 26

§ 8. ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ. ЭЛЕКТРОННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

Сначала полупроводник очистим, затем его
«загрязним»

Введем в кристалл германия некоторое количество атомов фосфора (P). Это можно осуществить, например, следующим способом. На максимально очищенный от примесей кристалл германия кладут капельку расплавленного фосфора. Температура плавления фосфора ниже температуры плавления германия, поэтому кристалл германия останется твердым. Атомы жидкого фосфора совершают беспорядочное тепловое движение. Они «атакуют» поверхность германия, проникают в его кристаллическую структуру все глубже и глубже. Такой процесс называют диффузией. Можно сказать, что атомы фосфора диффундируют в глубь кристаллической решетки германия. При диффузионном движении частицы занимают те области пространства, где их концентрация первоначально была меньше. Диффузия стремится выравнить концентрацию частиц примеси, т. е. распределить их равномерно по объему. Подчеркнем еще раз, что причиной диффузии является хаотическое тепловое движение частиц. Метод введения примесей в полупроводник, основанный на диффузии, называют диффузион-

пет. Этот образ должен пояснить тот факт, что четыре валентных электрона атома фосфора хорошо вписываются в кристаллическую решетку германия и образуют связи с соседними ионами решетки, тогда как пятый, валентный электрон оказывается «лишним».

Что происходит с этим электроном? Он удерживается «пятой рукой» иона фосфора и в то же время постоянно подвержен «толчкам», вызванным тем, что ион, совершая тепловое движение, «дрожит». При таких условиях лишний электрон легко теряется ионом, «отскакивает» от него и переходит в пространство между узлами решетки, т. е. становится свободным. На языке энергетических зон это значит, что электрон переходит в зону проводимости.

Таким образом примесь фосфора или другого пятивалентного вещества (например, мышьяка или сурьмы) увеличивает число свободных электронов в зоне проводимости кристалла германия или другого 4-валентного полупроводника, например кремния (Si). Поэтому такая примесь получила образное название донорной примеси, т. е. примеси, «отдающей» электроны. Заметим, что на число дырок в валентной зоне эта примесь никак не влияет.

Почему даже малая доля примеси существенно меняет проводимость полупроводника. Для этого надо определить, какое количество носителей заряда вносится в единицу объема полупроводника примесью. В 1 см^3 германия содержится около $4,5 \cdot 10^{22}$ атомов. Поэтому если заменить лишь каждый стотысячный атом германия атомом фосфора, то число свободных электронов — носителей заряда в 1 см^3 окажется равным $4,5 \cdot 10^{17}$. В 1 см^3 максимально чистого германия число электронов, в среднем находящихся в зоне проводимости при комнатной температуре, равно $2,5 \cdot 10^{13}$. Сравните эти цифры. Они показывают, что ничтожное количество примеси (1 атом примеси на 100 000 атомов германия!) увеличивает число свободных электронов в 10 000 раз!

Таким образом, полупроводники, в которые введена донорная примесь, проводят ток главным образом за счет движения свободных электронов в зоне проводимости. Такие полупроводники называют электронными или полупроводниками с электронной проводимостью *n*-типа. Последнее обозначение образовано от английского слова *negative* — отрицательный.

Сами свободные электроны, играющие здесь основную роль в процессе образования электрического тока, называют основными носителями заряда.

Легко догадаться, что такое название имеет смысл, если в электронном полупроводнике есть и неосновные носители заряда. Такими носителями являются дырки в валентной зоне, образующиеся в примесном полупроводнике точно так же, как в беспримесном — чистом (собственном).

Вернемся теперь к модели энергетических зон и изобразим ее для примесного электронного полупроводника. Наблюдали ли вы, как меняют лампы на высоких столбах освещения улиц города? Для этого используется подъемник, смонтированный на автомашине и поднимающий монтера наверх, так что ему достаточно протянуть руку и вывернуть перегоревшую лампу. Образно говоря, примесь фосфора играет роль подъемника и подносит электроны к краю зоны проводимости, куда они «без труда перескакивают» (рис. 29). Это как раз те «лишние» электроны, которые легко отрываются от атома фосфора. Значит, на модели энергетических уровней электронного полупроводника мы вблизи границы зоны проводимости должны изобразить уровни, на которых на-

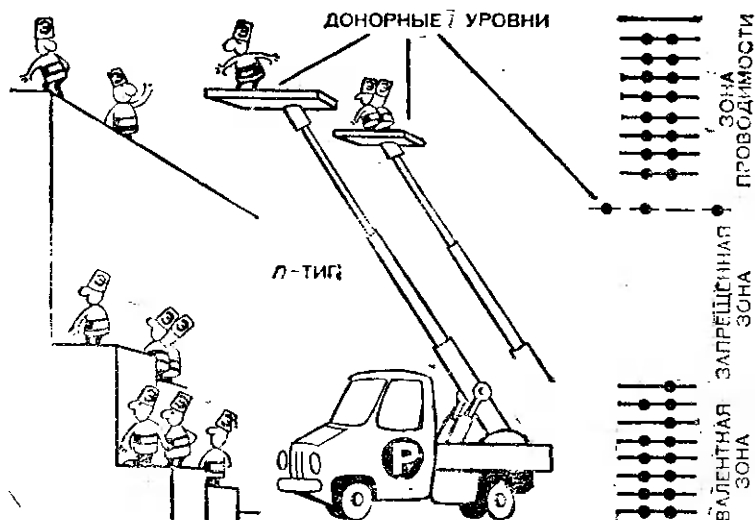


Рис. 29

ходятся пятые электроны примесных атомов. Такие уровни также называли донорными — «отдающими». Мы изобразили их на диаграмме штрихами. На этой диаграмме чисто условно представлено 16 свободных электронов — основных носителей заряда и только две дырки — неосновные носители заряда в полупроводнике *n*-типа.

Никогда не забывайте о существовании неосновных носителей заряда. Хотя их число мало по сравнению с числом основных носителей, они в ряде случаев играют далеко не последнюю роль. Но об этом позднее.

Что покажет опыт Холла, если в качестве образца использовать электронный полупроводник? Он зарегистрирует факт образования тока в образце (в первичной цепи) отрицательно заряженными частицами. В каком же случае мы обнаружим движение положительно заряженных частиц? К этому случаю мы теперь и перейдем.

§ 9. ДЫРОЧНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

Как нехватка электронов способствует увеличению электропроводимости полупроводника?

Введем в кристалл германия некоторое количество атомов индия (In). Индий является трехвалентным элементом. На валентной оболочке атома индия размещаются только три электрона, а не четыре, как у германия. Атомы индия по многим свойствам подобны атомам германия и поэтому легко вытесняют последние из узлов кристаллической решетки (рис. 30). При этом заряд иона трехвалентного индия мы должны считать равным $+3$ единицам. Соответственно число «рук» этого иона ва од-

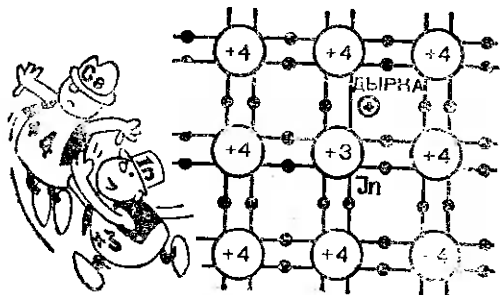


Рис. 30

ну меньше, чем у иона германия. Поэтому на модели кристаллической решетки, в которую «вторглись» ионы индия, автоматически появляются незаполненные электронами связи, т. е. дырки. Обратите внимание на то, что при этом число свободных электронов в зоне проводимости не увеличивается.

На введенные в решетку атомами индия дырки легко перескакивают электроны с других связей решетки. Это значит, что введенные дырки могут перемещаться по кристаллу и образовывать электрический ток.

Для того чтобы представить себе, как перемещается дырка по кристаллу, можно вспомнить известную игру — головоломку. В квадратную коробку помещено 15 квадратных пронумерованных фишек. Пусть первоначально фишки заполняют коробку беспорядочно и свободным остается левый верхний угол коробки, как это показано на рисунке 31. Игра состоит в том, чтобы, не вынимая фишек из коробки, а только передвигая их, расположить фишки в порядке следования номеров, так чтобы в конце концов свободным оказался правый нижний угол коробки. На рисунке 32 показано несколько промежуточных стадий этого процесса, не представляющих, конечно, оптимального решения задачи.

Вы видите, какой сложный путь по коробке проходит «дырка», т. е. свободное от фишки место, прежде чем фишки 1 и 2 встали на свои места. Мы говорим о перемещении свободного места — «дырки», тогда как на самом деле перемещаются пронумерованные фишки, которые можно сопоставить с электронами. Конечно, в кристалле электроны не пронумерованы и какая-либо дырка, если только нет электрического поля, движется беспорядочно. В этом отличие от приведенного нами примера, где в результате передвижения фишек мы стремимся восстановить определенный порядок следования цифр. Аналогия между движением фишек в нашей игре и электронов в полупроводнике была бы более полной, если бы фишки передвигала обезьяна, не знающая арифметики (рис. 33).

Примесь трехвалентного элемента в четырехвалентном полупроводнике называется акцепторной примесью, т. е. примесью, «принимающей» электроны.


	6	2	1
4	10	11	7
14	5	8	15
12	9	13	3

Рис. 31

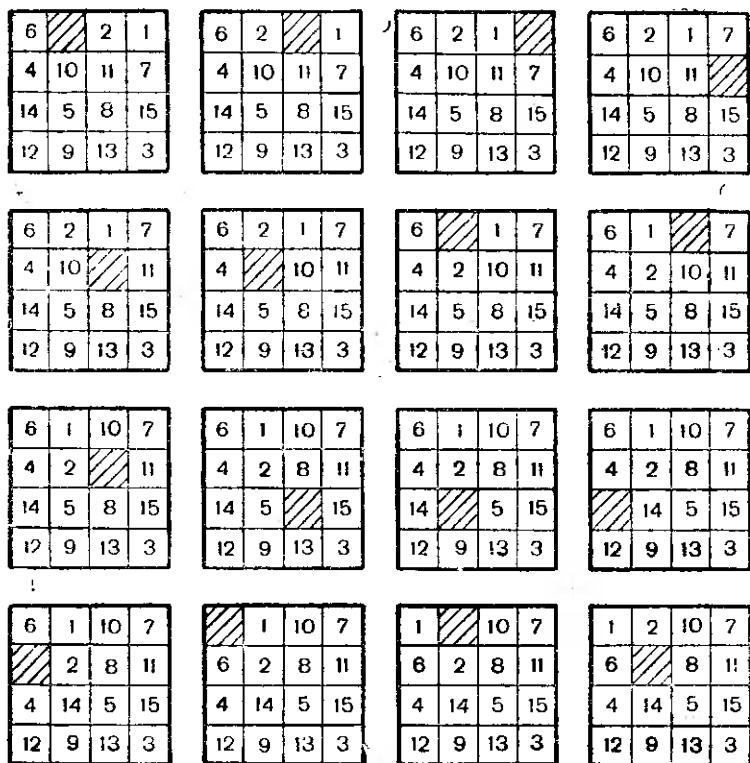


Рис. 32

Полупроводник с акцепторной примесью называют дырочным или полупроводником с дырочной проводимостью, иначе — с проводимостью *p*-типа. Основными

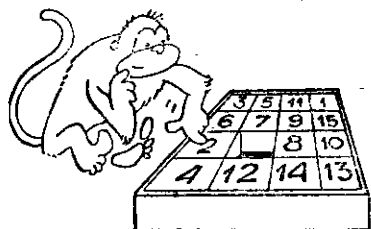


Рис. 33

носителями заряда в таком полупроводнике являются положительные дырки. Буква «*p*» является начальной в английском слове *positive* — положительный. Точно так же, как и в беспри-
месном собственном

полупроводнике, часть электронов переходит из валентной зоны в зону проводимости, используя при этом энергию теплового движения. Эти свободные электроны в дырочном полупроводнике являются неосновными носителями заряда.

Как же отразить действие акцепторной примеси на зонной модели полупроводника? Вы видите на рисунка 34, как высоко нужно «подпрыгнуть» электрону, чтобы из валентной зоны попасть в зону проводимости. При комнатной температуре на это способны лишь немногие электроны. Они образуют неосновные отрицательные носители заряда в зоне проводимости дырочного полупроводника. Чтобы обеспечить возможность ухода из валентной зоны большего числа электронов, надо «невысоко» над этой зоной соорудить дополнительные ступеньки. Именно такие ступеньки, называемые акцепторными уровнями, и создаются атомами примеси — индием.

На акцепторные уровни легко перескакивают валентные электроны, освобождая вакантные места в валентной зоне, т. е. создавая в этой зоне дырки. Эти дырки — основные носители заряда дырочного полупроводника способны перемещаться внутри валентной зоны. Они образуют проводимость *p*-типа.

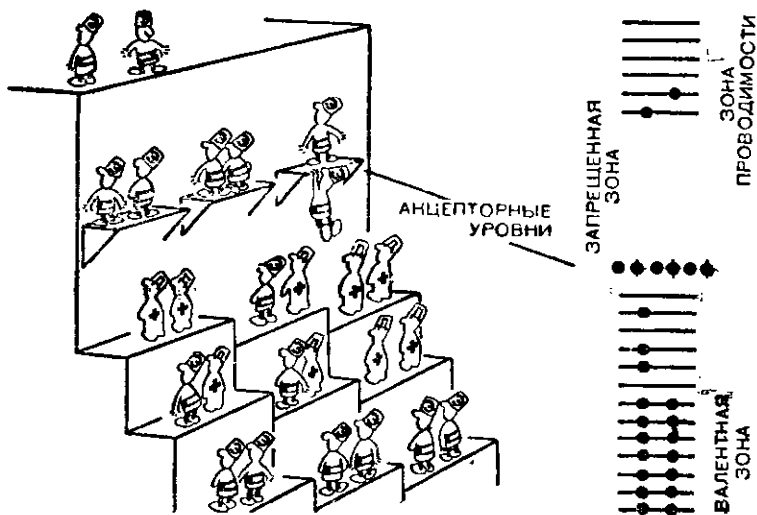


Рис. 34

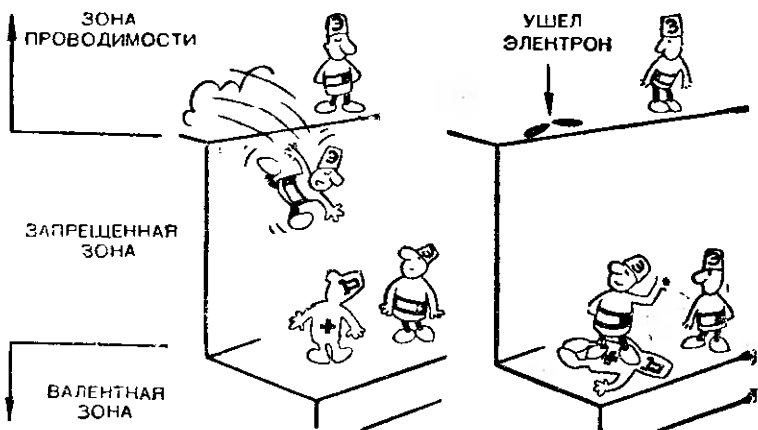


Рис. 35

разобраться в принципе действия многих полупроводниковых приборов.

Итак, одни электроны перескакивают в зону проводимости, другие в это же время возвращаются в валентную зону. В среднем же число электронов в зоне проводимости и число электронов и, следовательно, дырок в валентной зоне остается неизменным, если, конечно, нет каких-либо внешних причин, могущих нарушить это равновесие. Такое равновесное состояние называется **динамическим**.

Таким образом, распределение Больцмана представляет не статическую расстановку электронов по их местам, а показывает, какое среднее число электронов в течение достаточно большого интервала времени находится на том или ином уровне. При этом совершенно несущественно, что одни электроны на этом уровне беспрестанно заменяются другими.

Для более четкого понимания смысла понятия «динамическое равновесие» представим себе ярмарку со множеством ларьков (рис. 36). Пусть на этой ярмарке находится большое число посетителей. Посмотрим, чем они заняты. Мы фиксируем, что 8 человек пьют газированную воду, 9 толпятся около палатки с мороженым, 10 рассматривают книги, разложенные на прилавке, и т. д. Некоторые посетители просто гуляют между палатками.

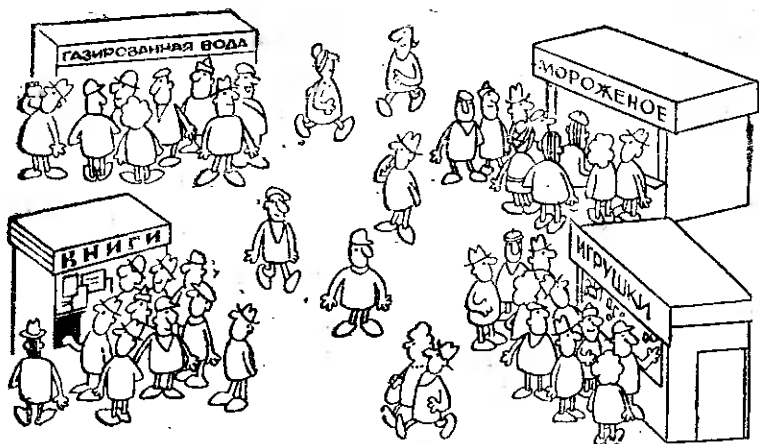


Рис. 36

Названные нами цифры соответствуют некоторому динамическому равновесию. Не одни и те же люди непрерывно пьют воду. Одни уходят, другие подходят к автоматам по продаже воды, но в среднем там собирается 8—12 человек (~ 10 человек). Также разные люди едят мороженое, но в среднем у палатки толпится 10—12 человек (~ 11 человек).

Это динамическое равновесие может нарушить какая-либо внешняя причина. Ею может быть, например, уход продавщицы мороженого на обед. Ясно, что после этого у лотка «Мороженое» останутся лишь очень большие любители мороженого, которые терпеливо будут ждать возвращения продавщицы. В среднем их оказалось, скажем, 2 человека. Представьте себе, что одновременно на ярмарку пришла лотошница с необыкновенно вкусными пирожками. Вокруг нее немедленно соберется толпа. Это неизбежно приведет к тому, что среднее число людей, пьющих воду или покупающих книги, уменьшится. Что же произошло? Установилось новое динамическое равновесие вместо старого, нарушенного уходом одной продавщицы и приходом другой.

Аналогичное динамическое равновесное распределение (по Больцману) свободных электронов (их числа в зоне проводимости) и дырок (их числа в валентной зо-

не) устанавливается в полупроводнике при данной температуре. Если увеличить температуру полупроводника, то динамическое равновесие нарушится, но вскоре установится новое равновесное состояние (снова по Больцману!), при котором среднее число свободных электронов возрастет. Увеличится, следовательно, и число дырок. Так как равновесие наступает быстро и отклонения от средних чисел малы, то мы можем пользоваться средними значениями, забывая о динамическом характере равновесия, как мы и делали до сих пор. Отклонения от равновесных значений, носящие случайный характер, как уже упоминалось, называют флуктуациями.

§ 11. УРОВЕНЬ ФЕРМИ

Еще раз о том, как электроны, нарушая порядок, все же его сохраняют

Понятие вероятности, о котором пойдет речь, требует определенной логики мышления, к которой надо привыкнуть. Поэтому не старайтесь во что бы то ни стало понять изложенное сразу. Книга написана так, что для дальнейшего понимания материала читать этот параграф не обязательно. Вы можете вернуться к нему позднее.

Перейдем к сути дела. Мы познакомились с понятием динамического равновесия, узнали закон распределения Больцмана и можем сказать, что при данной температуре в заданном интервале вблизи некоторого уровня энергии находится в среднем определенное число электронов. Обозначим его, например, буквой N . Остановимся теперь еще раз на смысле слов «в среднем». Для уточнения смысла этих слов сделаем следующий опыт. Возьмем коробку с крышкой такую, чтобы в ней могло свободно поместиться 20 шаров, различающихся только цветом. Пусть 10 шаров покрашены в белый цвет, а остальные 10 — в черный. Положим шары в коробку, закроем ее и встряхнем несколько раз так, чтобы шары внутри коробки, перекашиваясь, хорошо перемешались. Затем поставим коробку на стол и откроем крышку. Посчитаем, сколько белых (или черных) шаров оказалось в левой и правой половинах коробки. Повторяя этот опыт много раз, можно убедиться в том, что чаще всего реализуется ситуация, при которой число ша-

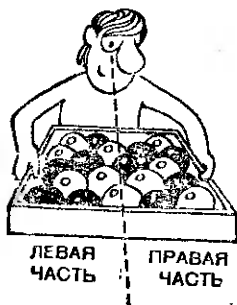


Рис. 37

ров одного цвета в левой и правой частях коробки одинаково, как это показано на рисунке 37. Реже будет встречаться результат: 6 белых шаров слева и 4 белых шара справа или наоборот; еще реже ситуация 7 белых слева, 3 — справа, еще реже 8 белых слева, 2 — справа, очень редко 9 белых слева, 1 — справа и совсем редко — все белые шары в одной из частей коробки.

Этот опыт поясняет понятие вероятности распределения шаров разных цветов в объеме коробки.

Если шары одинаковы и при встряхивании коробки хорошо перемешиваются, то наиболее вероятной оказывается ситуация, при которой число шаров одного цвета в разных частях коробки одинаково. Это значит, что слова «наиболее вероятная» имеют смысл: «реализуется чаще всех других возможных вариантов». В проделанном опыте результат обусловлен тем, что нахождение какого-либо шара в той или другой части коробки равновероятно.

Вернемся теперь к вопросу о размещении электронов по энергетическим уровням, которое осуществляется в среднем по закону распределения Больцмана. Мы можем пояснить теперь, что в слова «в среднем» здесь также вкладывается смысл: распределение по Больцману реализуется чаще всего, оно наиболее вероятно и отклонения от него встречаются тем реже, чем больше эти отклонения. Это значит, что названное выше число электронов на определенном энергетическом уровне не остается строго фиксированным и равным N , а что при подсчете этого числа мы чаще всего получим результат, равный N . Это наиболее вероятное число электронов на определенном энергетическом уровне, соответствующее распределению Больцмана при заданной температуре.

Итак, мы ввели понятие вероятности. Рассмотрим в качестве примера, поясняющего физический смысл этого понятия, еще раз задачу о распределении электронов по уровням энергетических зон беспримесного (чистого, собственного) полупроводника. На рисунке 38 воспроизведена диаграмма энергетических уровней для такого по-

лупроводника. Она составлена для комнатной температуры, при которой лишь небольшая часть электронов способна преодолеть запрещенную зону. Поэтому на диаграмме показано относительно мало электронов в зоне проводимости. Мы недаром употребили термин «относительно мало». Физики никогда не бывают удовлетворены словом «мало» или «много», а всегда спрашивают, «по сравнению с чем мало или много?». Действительно, по сравнению с Солнцем Земля ничтожно мала, а по сравнению с футбольным мячом она огромна. Можно ли считать Землю большой или малой, зависит от условия решаемой задачи, например движения Земли как планеты вокруг Солнца, либо падения на Землю футбольного мяча.

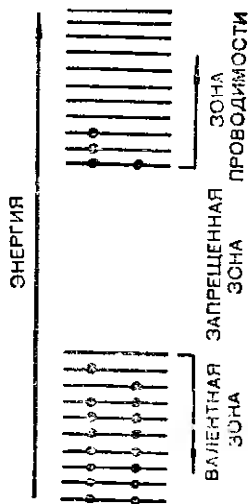


Рис. 38

Чему же соответствует малое число свободных электронов в зоне проводимости германия при комнатной температуре? Эту цифру мы уже называли. Она равна $2,5 \cdot 10^{13}$ электронов в 1 см^3 и мала по сравнению с $4,5 \cdot 10^{17}$ электронами в 1 см^3 германия с примесью фосфора при аналогичных условиях. Названные цифры еще раз показывают, что изображенная нами диаграмма энергетических уровней весьма условна. Строго говоря, мы должны были бы изобразить на этой диаграмме по крайней мере $\frac{2,5}{2} \cdot 10^{13}$ уровней в валентной зоне, так как на каждом уровне размещается не более двух электронов (принцип Паули!).

На самом деле число уровней определяется числом атомов, составляющих кристаллическую решетку германия, и обычно еще во много раз превышает $2,5 \cdot 10^{13}$. А это значит, что, выбрав небольшой интервал энергий вблизи дна зоны проводимости, мы обнаружим, что электронами заполнена лишь часть энергетических уровней, входящих в этот интервал.

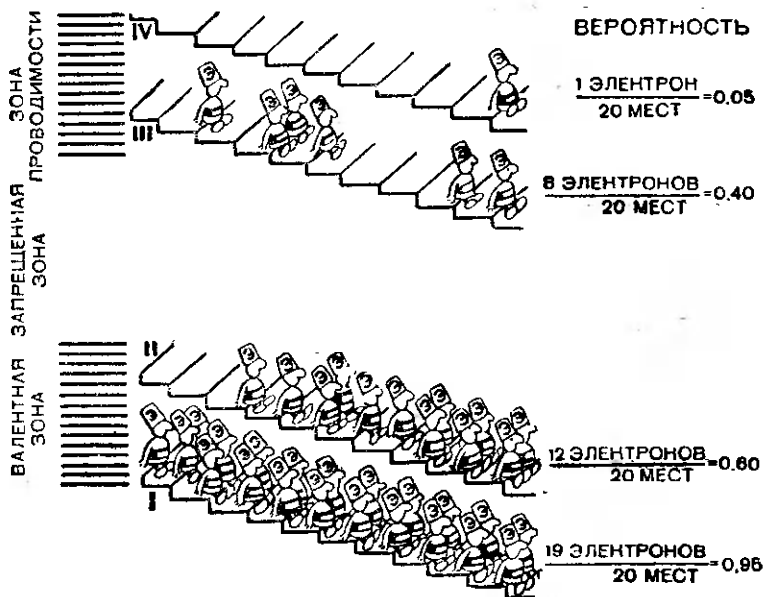


Рис. 39

Как же оценить, какая часть энергетических уровней в среднем заполняется? Вот для этой оценки и вводится понятие вероятности нахождения электронов на уровнях энергии. Если в среднем при динамическом равновесии из десяти соседних уровней заполнено лишь 2, то говорят, что вероятность нахождения электронов на этих уровнях равна при данных условиях $\frac{2}{10} = 0,2$, или 20%.

В соответствии с понятием вероятности приведенное число означает, что, регистрируя большое число раз ситуацию заполнения рассматриваемых десяти уровней, мы чаще всего получим результат: 2 уровня из 10 заполнено.

Как же меняется вероятность заселения уровней энергии электронами чистого германия? Рассмотрим энергетическую диаграмму чистого германия (рис. 39). Для оценки вероятности выберем по 10 энергетических уровней в разных частях диаграммы, показанных на рисунке: I — в глубине валентной зоны, II — вблизи потолка валентной зоны, III — вблизи дна зоны проводимости, IV — высоко в зоне проводимости.

На 10 уровнях может разместиться 20 электронов. В соответствии с показанным на рисунке заполнением уровней при динамическом равновесии для заданной температуры вероятности заполнения уровней равны соответственно 0,95; 0,6; 0,4 и 0,05.

При увеличении температуры, как уже было показано, заселенность более высоких уровней будет расти и поэтому вероятности заполнения уровней валентной зоны будут падать, а уровней зоны проводимости увеличиваться.

В теории полупроводников важно знать, где расположен уровень энергии, вероятность заполнения которого электронами равна 0,5. Этот уровень получил специальное наименование и называется уровнем Ферми, по имени известного итальянского физика. Где же расположен уровень Ферми беспримесного полупроводника (например, чистого германия)? Вспомним, что в таком полупроводнике число электронов в зоне проводимости точно равно числу дырок в валентной зоне. Зная это, нетрудно сообразить, что вероятность заполнения симметрично расположенных относительно запрещенной зоны уровней энергии в зоне проводимости и валентной зоне в сумме равна единице. (В нашем примере это $0,4 + 0,6 = 1$.) А это значит, что уровень Ферми, вероятность заполнения которого равна 0,5, должен располагаться в середине запрещенной зоны, как это показано на рисунке 40, где уровень Ферми обозначен через E_F .

У читателя возникает законный вопрос. Вероятность заполнения уровня Ферми равна 0,5, но он лежит внутри запрещенной зоны. Значит, на этом уровне электроны находиться не могут. Это совершенно верно. Объяснить, почему это так, может лишь квантовая физика. Мы же должны здесь толковать смысл уровня Ферми следующим

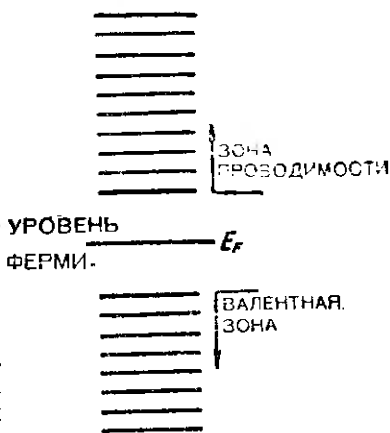


Рис. 40

щим образом: «Если бы внутри запрещенной зоны в месте расположения уровня Ферми имелись разрешенные энергетические уровни, то они заполнялись бы с вероятностью, равной 0,5».

Остановимся теперь на таком весьма важном вопросе: где расположен уровень Ферми в примесных полупроводниках *n*- и *p*-типов?

Начнем с полупроводника *n*-типа. Введение донорной примеси (например, фосфора в германий), как мы уже установили, сильно увеличивает число электронов в зоне проводимости, не меняя при этом числа дырок в валентной зоне. Это значит, что вероятность заполнения уровней зоны проводимости должна расти и, следовательно, уровень Ферми должен сместиться вверх от середины запрещенной зоны ко «дну» зоны проводимости.

Аналогичные рассуждения позволяют утверждать, что в полупроводнике *p*-типа уровень Ферми должен сместиться от середины запрещенной зоны вниз к «потолку» валентной зоны.

§ 12. ДИФФУЗИЯ И ДРЕЙФ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА

Может ли электрический ток существовать без внешнего электрического поля?

Вернемся к вопросу об образовании электрического тока — направленного движения зарядов. Что заставляет электроны в металле, электроны и дырки в полупроводнике двигаться не только хаотически, но и направленно? Мы говорили о силе, с которой электрическое поле действует на электроны. В результате действия этой силы и столкновений с ионами решетки электроны и дырки движутся с постоянной средней скоростью, тем большей, чем больше приложенная сила (см. § 2). Такое движение заряженных частиц в электрическом поле называют дрейфом.

Однако в полупроводниковых приборах движение носителей тока далеко не всегда является дрейфовым. К рассмотрению другого типа движения заряженных частиц, играющего во многих случаях решающую роль, мы сейчас и переходим. Это диффузия носителей заряда. Выше о диффузии уже упоминалось, когда речь шла о введении примесей в полупроводник.

Для того чтобы лучше понять, что называют диффузией, представим себе, что несколько автобусов сразу привезли к берегу реки 300 человек рыболовов.

Как вы думаете, будут ли эти рыболовы удить рыбу все вместе на малом клочке берега возле автобусов или постараются рассредоточиться по всему берегу реки? Наверное, случится именно второе.

Предположим, что рыболовы прибыли к этой реке впервые. Поэтому они вряд ли сразу найдут подходящее для себя место, а будут ходить вдоль реки взад и вперед, все удаляясь от автобусов. Вот это движение рыболовов и напоминает диффузию заряженных частиц в полупроводнике. Первоначально в месте высадки «концентрация рыболовов», т. е. число людей, приходящихся на единицу площади, была велика. Зато берег реки был пуст, и там «концентрация рыболовов» равна нулю. Диффузионное движение рыболовов происходит в тех направлениях, где берег еще почти свободен и «концентрация рыболовов» меньше. Точно так же если в полупроводнике в некотором месте образуется избыток носителей зарядов, т. е. концентрация их больше равновесной, то в результате теплового движения носители заряда постепенно распределяются по всему полупроводнику, так что концентрация их в среднем всюду оказывается одинаковой. Это движение и называют диффузией. В отличие от рыболовов носители заряда не остановятся и после установления равновесия. Тепловое движение их будет продолжаться, однако это не нарушит уже в среднем распределение носителей по объему полупроводника — устанавливается динамическое равновесие (см. § 10).

Глава II.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

От физики полупроводников к полупроводниковым приборам

Что такое полупроводниковые приборы? Почему очень важно познакомиться с ними читателям, уже изучившим основные свойства полупроводников и особенности процессов проводимости в них?

Из огромного количества приборов, применяемых в науке и технике, полупроводниковые приборы выделяются тем, что позволяют управлять силой тока или напряжением в электрических цепях с помощью каких-либо внешних воздействий — тепловых, световых, электрических и т. д.

Почему же именно полупроводники выбраны из всего многообразия веществ для создания таких приборов? Все дело в том, что именно полупроводники, в частности их электрическая проводимость, очень чувствительны ко всякого рода воздействиям. Выяснение вопроса, как же эти воздействия влияют на свойства полупроводников, поможет читателям не только более глубоко понять физические свойства полупроводников, но и представить себе огромное практическое значение этих материалов для современной техники.

Итак, отправимся в этот увлекательный мир!

§ 1. ТЕРМОРЕЗИСТОРЫ

Управление нагреванием

Первым прибором, на котором мы остановимся, будет терморезистор — прибор, изменяющий свою проводимость под действием нагревания или охлаждения.

Читатели, вероятно, помнят, что проводимость полупроводников зависит от концентрации свободных носителей заряда. Однако полупроводники, имеющие одну и ту же концентрацию носителей заряда, все-таки могут иметь различную проводимость. В чем здесь дело?

Представим себе широкую улицу, плотно заполненную движущимися машинами. Мы стоим у перекрестка и подсчитываем количество машин, проезжающих перекресток за 1 с. Очевидно, если скорость движения машин возрастет вдвое, то и подсчитываемое нами количество тоже увеличится в два раза при постоянной плотности заполнения улицы машинами. Итак, поток машин зависит не только от их плотности, но и от скорости их передвижения.

Если теперь от машин вернуться к электронам в полупроводнике, то станет ясно, что при одном и том же приложенном напряжении электрический ток будет зависеть не только от концентрации свободных электронов, но и от скорости их перемещения в электрическом поле. Скорость перемещения электронов в электрическом поле с напряженностью 1 В/м условились называть подвижностью электронов.

Что же в основном изменяется при нагревании или охлаждении полупроводника — концентрация носителей заряда или их подвижность? Оказывается, ответ на этот вопрос зависит от того, о каком именно полупроводнике идет речь.

Можно ли, например, сделать терморезистор из германия? Вспомним особенности зонной структуры германия, в который введена примесь, т. е. примесного германия.

Примесный уровень находится обычно вблизи края зоны проводимости или валентной зоны. Энергия отрыва электрона от примесного атома сравнительно невелика, так что уже при комнатной температуре примесные атомы теряют свои валентные электроны за счет своей внутренней энергии.

Предположим, что мы нагреваем такой полупроводник на несколько градусов, начиная от комнатной температуры. Изменение числа свободных носителей заряда будет относительно слабым, так как почти все примеси ионизованы, а для переброса электронов непосредственно из валентной зоны в зону проводимости нагревания еще не-

достаточно. Если к этому добавить, что подвижность носителей заряда в германии также относительно слабо зависит от температуры, то станет ясно, что при температурах, близких к комнатной, «управляющие» свойства германиевого терморезистора не будут достаточно высокими.

При каких же температурах могут работать германиевые терморезисторы? При температурах, когда внутренняя энергия кристаллической решетки является достаточной для переброса носителей заряда из валентной зоны в зону проводимости (собственная проводимость). А такие температуры для примесного германия значительно выше комнатной.

Из чего можно изготовить терморезистор, работающий при комнатных температурах?

Изучая различные типы полупроводников, ученые обнаружили группу оксидных соединений — TiO_2 , ZnO , SnO_2 , In_2O_3 и др., обладающих полупроводниковыми свойствами. Однако физические причины наличия таких свойств оказались в значительной мере отличными от того, что наблюдалось в таких «элементарных» полупроводниках, как германий или кремний.

Все металлы в полупроводниковых оксидах принадлежат к группе так называемых переходных металлов. Они имеют частично не заполненные электронные оболочки и при определенных условиях легко изменяют свою валентность в химических соединениях, в том числе и в оксидах. Поэтому при определенном способе изготовления оксид, помимо кислорода, содержит смесь ионов металла, находящихся в разных валентных состояниях.

Электроны «в гостях» у ионов

Каждый ион металла с меньшей валентностью может относительно легко отдать один электрон. Этот электрон становится свободным. Другой ион металла с большей валентностью столь же легко принимает этот свободный электрон, понижая при этом свою валентность. Этот обмен электронами изображен на рисунке 41.

Что же изменяется в полупроводниковом оксиде с ростом температуры? Колеблющиеся с большей энергией

ионы металла будут более легко обмениваться электронами, так что в среднем время пребывания электронов «в гостях» у ионов сократится. Можно считать, что при этом электроны становятся как бы «более свободными». Следовательно, нет ничего удивительного в том, что подвижность электронов при наложении электрического поля возрастет! В этом случае электроны напоминают сытых пчел, которые меньше задерживаются на каждом цветке и, следовательно, быстрее перелетают цветочное поле.



Рис. 41

Этот эффект в полупроводниковом оксиде оказывается очень сильным даже при температурах, близких к комнатной, и позволяет получить высокоэффективные терморезисторы для этого диапазона температур.

«Пирожки» из полупроводниковых оксидов

Остановимся на способе изготовления наиболее широко используемых в технике оксидных терморезисторов. Технология их получения напоминает выпечку кондитерских изделий. Сначала готовят «муку» — мелкий порошок из оксида. Затем получают «тесто», смешивая «муку» с пастой из специальных органических веществ. Это «тесто» загружают в шприц и выдавливают в виде трубочек. Трубочки разрезают на небольшие цилиндрики и помещают в печь с температурой около 1000°C .

В процессе «выпечки» органические вещества выгорают, а частички исходного порошка прочно спекаются друг с другом. Цилиндрики приобретают таким образом механическую прочность. Кроме того, в процессе спекания оксид обогащается разновалентными ионами металла. На полученные «полуфабрикаты» с краев наносят серебряные контакты — и терморезисторы готовы!

Терморезистор служит людям

Немного технической фантазии — и читатель представит себе ситуацию, когда терморезистор помогает потушить пожар. Представьте себе, что терморезистор T под-

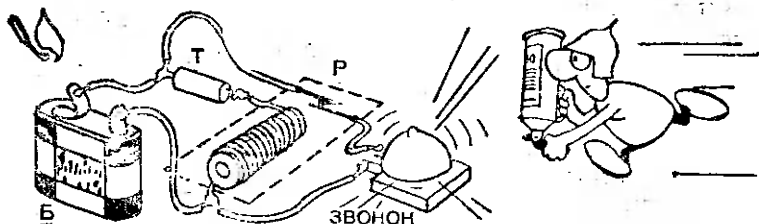


Рис. 42

ключен к батарее постоянного тока *Б* последовательно с катушкой электромагнитного реле *Р*, как показано на рисунке 42. При нормальной температуре сопротивление терморезистора относительно велико, так что ток через катушку недостаточен для замыкания контактов реле. Но стоит возникнуть пожару, температура в помещении повысится, ток через катушку возрастет и реле замкнет контакты аварийной сигнализации — зазвонит звонок.

Отметим, что приведенный пример, конечно, не исчерпывает всех многочисленных применений этого хотя и простого, но очень полезного для техники прибора.

§ 2. ФОТОРЕЗИСТОРЫ

Фотоны нарушают равновесие в полупроводнике

Чувствителен ли полупроводник к потоку фотонов? На этот вопрос мы уже ответили положительно в первой главе. Однако вспомним еще раз, в чем тут дело.

Пусть собственный полупроводник (примесей нет!) долгое время находится при комнатной температуре. В этом случае процесс непрерывного «рождения» свободных электронов за счет внутренней энергии кристалла уравнивается процессом их рекомбинации с дырками. При этом концентрации свободных электронов и дырок очень малы и равны между собой.

Теперь осветим полупроводник, не меняя его температуры. Если длина волны излучения будет слишком большой, то никаких изменений в полупроводнике мы не заметим. Но, начиная с некоторой длины волны, концентрация свободных носителей заряда станет заметно возрастать. При этой граничной длине волны энергия фотонов

оказывается достаточной для переброса электронов через запрещенную зону в зону проводимости. Иначе говоря, чтобы полупроводник «почувствовал» излучение, энергия фотонов должна быть равна (или больше) энергии, необходимой электрону, чтобы преодолеть запрещенную зону.

А что же получается с нарушенным равновесием в полупроводнике? С ростом скорости «рождения» свободных носителей заряда соответственно несколько возрастает и скорость их рекомбинации. В результате, если не менять условий освещения, устанавливается новое равновесие, при котором новая концентрация носителей оказывается все-таки большей, чем при отсутствии освещения. Ну а это, в свою очередь, означает, что с ростом освещенности проводимость полупроводника должна расти, так же как и при его нагревании.

Как устроены и работают фоторезисторы?

Это интересное свойство полупроводников используется для создания еще одного прибора — фоторезистора. Этот прибор устроен столь же просто, как и терморезистор, — он состоит из пластины полупроводника, снабженной по краям металлическими контактами. К контактам фоторезистора подключается источник постоянного напряжения (рис. 43). В темноте сила тока в цепи фоторезистора очень мала, но стоит осветить фоторезистор (длина волны излучения не должна быть слишком большой!), как сила тока резко возрастает.

Мы не будем специально описывать способ изготовления фоторезисторов по той причине, что он очень напоминает «пирожковую» технологию терморезисторов. Разница состоит лишь в выборе самих полупроводников. Оказалось, что наиболее чувствительны к излучениям такие полупроводники, как PbS , PbSe , CdS и CdSe . Эти полупроводники имеют раз-

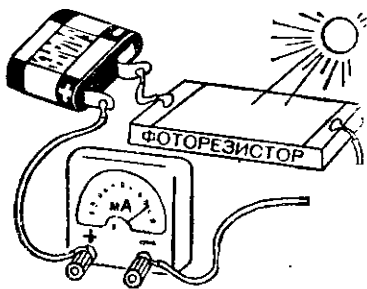


Рис. 43

личную ширину запрещенной зоны, и это позволяет изготавливать фоторезисторы, реагирующие на излучение, начиная с видимого и кончая инфракрасным.

Фоторезисторы экономят электроэнергию

Можно было бы привести множество примеров применения этих полезных приборов, но приведем лишь один.

Трудно точно угадать момент, когда на улице достаточно стемнело и пора включать уличное освещение. В этом случае могут помочь фоторезисторы. Они выдадут сигнал автоматическим устройствам как раз тогда, когда их проводимость с наступлением темноты достигнет заданной величины. И наоборот, с наступлением рассвета эти недремлющие помощники человека автоматически выключают освещение.

§ 3. p — n -ПЕРЕХОД

Кое-что из радиотехники

Итак, мы познакомились с электрическими свойствами полупроводников и двумя простыми полупроводниковыми приборами — терморезистором и фоторезистором.

Обратим теперь внимание читателя на одну важную деталь: для работы этих приборов совершенно несущественна полярность подключенного к ним источника напряжения. Иначе говоря, эти приборы обладают симметричной вольт-амперной характеристикой.

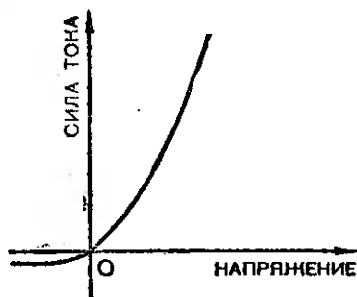


Рис 44

Но давайте вместе с читателем еще раз заглянем в школьный учебник физики, туда, где описаны широко применяемые в радиотехнике выпрямитель переменного тока и детектор сигналов в радиоприемнике. Для работы этих схем необходимы элементы, хорошо пропускающие электрический ток в одном на-

правления и плохо — в другом. Иначе говоря, такие элементы должны обладать резко несимметричной вольт-амперной характеристикой, примерно такой, какая показана на рисунке 44.

Оказалось, что такую характеристику имеет система из двух соединенных вместе полупроводников с различным типом проводимости — p и n . Эту систему и называют p — n -переходом.

Проведите простой эксперимент!

Возьмите любой имеющийся в продаже полупроводниковый диод — это тот же p — n -переход, только заключенный в корпус и снабженный электрическими выводами. Источником напряжения послужит батарейка от карманного фонаря с напряжением 4,5 В, а для измерения силы тока пригоден любой миллиамперметр со шкалой 10—30 мА. Последовательно с миллиамперметром и диодом подсоедините резистор с электрическим сопротивлением 1000—1500 Ом, чтобы ток через диод не оказался слишком большим.

Порядок проведения опыта поясняет рисунок 45. В нашем слюте полупроводниковый диод ведет себя подобно вентилю водопровода. Если включить его, как показано на левом рисунке, он не оказывает электрическому току почти никакого сопротивления и миллиамперметр показывает силу тока, равную (по закону Ома!) напряжению батарейки, деленному на сопротивление резистора («вентиль» открыт).

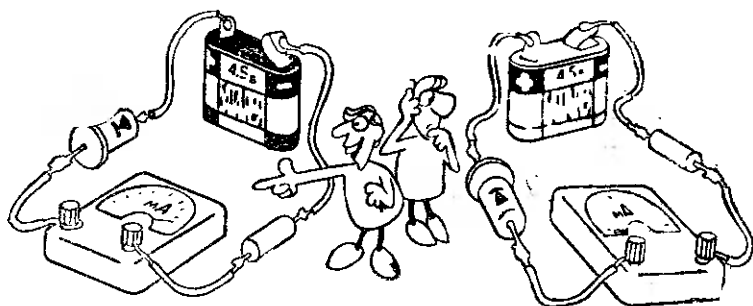


Рис. 45

Но стоит включить диод в обратном направлении, как показывает правый рисунок, и электрическая цепь оказывается практически разомкнутой — отклонение стрелки миллиамперметра близко к нулю («затвор» закрыт)!. Вот мы на опыте убедились в резкой несимметричности вольт-амперной характеристики $p-n$ -перехода.

Изготовить $p-n$ -переход совсем не просто!

«Я знаю, как изготовить $p-n$ -переход», — скажут некоторые читатели. «Надо просто посильнее прижать друг к другу два хорошо отполированных куска полупроводника p - и n -типов!»

Однако, к сожалению, такой переход никуда не годится. Мало того, что даже хорошо отполированные поверхности полупроводников содержат массу мельчайших неровностей. Поверхность полупроводника всегда покрыта тонким слоем оксида, который изолирует куски полупроводников друг от друга.

Кроме того, на поверхности полупроводников кристаллическая решетка не является строго периодичной, а это приводит к резкому различию электрических свойств поверхности кристалла и свойств его «внутренней части». Короче говоря, механический контакт двух полупроводников не дает ожидаемых результатов!

О бутерброде с маслом...

Любой читатель знает, что нужно сделать для получения бутерброда с маслом, или, образно говоря, для получения «перехода масло — хлеб». Но процедура намазывания оказалась бы ненужной, если бы каким-либо волшебным способом удалось превратить верхний слой хлеба непосредственно в масло!

Оказывается, нечто подобное можно осуществить с полупроводниками. Представьте себе пластину полупроводника, например n -типа, и пусть концентрация примеси в ней равна N_D . Введем каким-нибудь способом в часть этой пластины некоторое количество атомов-акцепторов, так чтобы их концентрация N_A оказалась намного больше N_D . Тогда в этой части пластины дырки окажутся основными носителями заряда, а это значит, что тип проводимости изменится на противоположный.

А как это делают на производстве?

Посмотрим, каким образом изготавливают так называемые сплавные $p-n$ -переходы (рис. 46). На образец кремния n -типа кладут кусочек алюминия (алюминий — акцептор для кремния!). Все это ненадолго помещают в печь с температурой 580°C . При этой температуре на границе соприкосновения кремния с алюминием образуется жидкий расплав, хотя остальная часть алюминия и кремния остается твердой.

Для радиолюбителей будет понятен следующий аналогичный пример: припой, в котором смешаны олово и свинец, имеет значительно более низкую температуру плавления, чем олово и свинец в отдельности.

В жидком расплаве атомы алюминия равномерно распределяются среди атомов кремния. После нагревания пластину полупроводника вынимают из печи и охлаждают. Жидкий расплав кристаллизуется и получается твердый слой кремния с примесью алюминия. При этом ионы алюминия, замещая ионы кремния в кристаллической решетке, не нарушают ее совершенства, а лишь изменяют тип проводимости полупроводника. Таким образом, в промежуточном слое между алюминием и кремнием образуется $p-n$ -переход.

Что же происходит внутри $p-n$ -перехода?

«Заглянем» внутрь $p-n$ -перехода и понаблюдаем за поведением электронов и дырок.

Представьте себе, что первоначально разделенные n - и p -области в некоторый момент времени соединились,

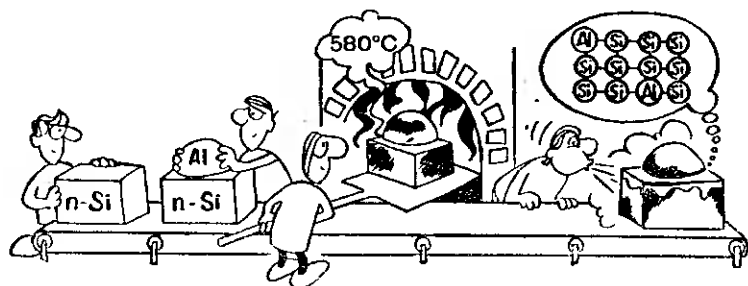


Рис. 46

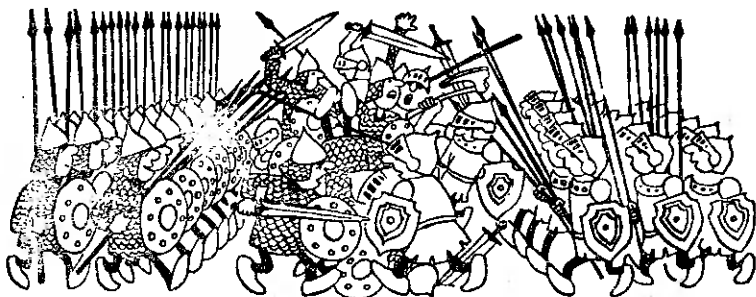


Рис. 47

образовав $p-n$ -переход. Для огромного числа электронов n -области соседняя p -область «представляется» почти пустой — там имеется лишь небольшое количество неосновных электронов. Столь же «пустой» будет «казаться» и n -область для дырок p -области. Поэтому в первый момент времени начинается встречная диффузия электронов в p -область и дырок в n -область (вспомните «диффузию» рыболовов, описанную в первой главе!). Несмотря на то что электроны и дырки движутся в противоположных направлениях, технические направления электронного и дырочного токов совпадают. Складываясь, эти токи образуют полный диффузионный ток основных носителей через $p-n$ -переход.

Какова дальнейшая судьба диффундирующих носителей, например электронов? Перейдя границу областей, они становятся неосновными, причем избыточными, лишними по сравнению с равновесным количеством электронов в p -области. Это нарушает динамическое равновесие, и избыточные электроны рекомбинируют с дырками уже вблизи от границы областей. Такова же судьба дырок, проникающих в n -область.

Ситуация напоминает картину боя при столкновении «стенка на стенку» двух враждующих войск (рис. 47). В сражении участвуют в первую очередь воины, находящиеся на переднем крае сражения. Лишь немногим из них удастся проникнуть в глубь вражеского войска, но они погибают под превосходящими по силе ударами врага. В результате между войсками образуется «мертвая зона», где относительно мало тех и других воинов. В то же время вдали от переднего края строй воинов остается почти неизменным.

Эта «мертвая зона» в p — n -переходе толщиной в доли микрометра с резко сниженной концентрацией свободных носителей заряда называется обедненным слоем.

Что же дальше? Казалось бы, диффузия электронов и дырок будет продолжаться до полного выравнивания их концентраций по обе стороны от перехода. Но все оказывается несколько сложнее.

Вспомним, что в обычном состоянии полупроводник электронейтрален. Но стоит удалить, например, из полупроводника n -типа свободные электроны, как он приобретет положительный заряд «оголенных», т. е. электрически нескомпенсированных донорных ионов. То же произойдет и с полупроводником p -типа при удалении дырок, только оставшийся заряд будет отрицательным.

Теперь обратимся к «анатомии» обедненного слоя. «Оголение» примесных ионов происходит по обе стороны от перехода. Поэтому обедненный слой на самом деле — двухслойный: на n -стороне — положительные заряды доноров, на p -стороне — отрицательные заряды акцепторов. Получается не что иное, как своеобразный заряженный конденсатор. Нетрудно сообразить, что электрическое поле этого конденсатора направлено так, чтобы помешать диффузии электронов и дырок (рис. 48). Получается так, что электроны и дырки сами себе воздвигают барьер, который им же приходится преодолевать!

На этом, однако, роль электрического поля не ограничивается.

Неосновные электроны, беспорядочно перемещаясь по p -области, случайно могут оказаться вблизи границы обедненного слоя. Тогда они подхватываются электрическим полем и дрейфуют в соседнюю n -область. Дырки таким же образом могут дрейфовать в p -область. Эти переходы электронов и дырок образуют полный дрейфовый ток неосновных носителей через p — n -переход. Важно отметить, что этот дрей-

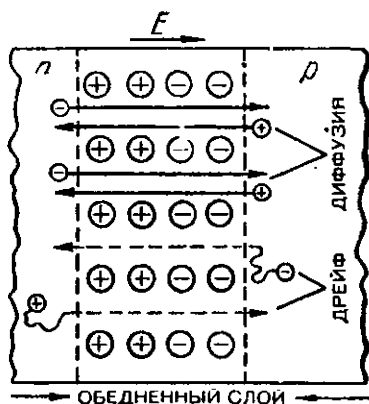


Рис. 48

фовый ток направлен противоположно диффузионному току!

Сила тока дрейфа очень мало зависит от напряженности электрического поля (лишь бы оно захватило электроны и дырки!) и в основном определяется концентрацией неосновных носителей: ведь чем она больше, тем чаще носители будут появляться вблизи обедненного слоя.

Будем приближенно считать, что сила тока дрейфа неосновных носителей — величина постоянная. Остается теперь выяснить вопрос: когда же и при каких условиях в $p-n$ -переходе наступит равновесие?

Давайте сначала решим, по какому признаку можно определить момент наступления равновесия. Возьмем, например, два сосуда, перекрытые краном в соединяющей их трубке. В одном из сосудов находится газ, другой сосуд пуст. Если открыть кран, то в первый момент возникает направленный поток молекул в пустой сосуд. Через некоторое время молекулы распределяются в сосудах поровну — вот тогда и наступит равновесие в системе. Заметьте, что при равновесии возможны переходы отдельных молекул из одного сосуда в другой и обратно, но самое главное — отсутствует направленный поток молекул из одного сосуда в другой.

Если мы вернемся к $p-n$ -переходу, то можно догадаться, что при равновесии полный ток через границу областей должен быть равен нулю.

Теперь попытаемся представить себе весь процесс установления равновесия в $p-n$ -переходе. С момента соединения p - и n -областей возникает значительный диффузионный ток. Вследствие рекомбинации носителей расширяется обедненный слой и в нем нарастает электрическое поле. Поле ограничивает диффузию и рождает обратный дрейфовый ток. Напряженность электрического поля растет до тех пор, пока сила тока диффузии не станет равна силе тока дрейфа. При этом, конечно, не прекращаются отдельные переходы электронов и дырок как под действием разности концентраций, так и под действием поля, но в целом полный ток через $p-n$ -переход остается равным нулю.

Почему же вольт-амперная характеристика $p-n$ -перехода несимметрична?

Представим себе, что каким-то образом нам удалось проникнуть внутрь $p-n$ -перехода и увеличить там напряженность электрического поля. Как повлияет это на баланс диффузионного и дрейфового токов?

Что касается дрейфового тока, то мы договорились считать его приблизительно постоянным. Однако в отношении диффузионного тока это далеко не так. Ведь в диффузии могут участвовать лишь «энергичные» электроны и дырки, которые способны преодолеть «мешающее» им электрическое поле. Но если напряженность поля возросла, то требования к энергии носителей также следует повысить. Теперь все будет зависеть от того, найдутся ли в полупроводнике еще более энергичные основные носители заряда?

Для ответа на этот вопрос вспомним распределение Больцмана для свободных носителей заряда в зоне проводимости полупроводника (см. первую главу). Согласно этому распределению, с ростом энергии число носителей, ею обладающих, резко сокращается. Значит, с ростом напряженности электрического поля сила тока диффузии должна уменьшиться до пренебрежимо малого значения. Это нарушает равновесие, и через переход потечет в основном ток неосновных носителей. Сила тока дрейфа в этом случае тоже очень мала и составляет у хороших переходов доли или единицы микроампер.

Теперь представим себе, что напряженность электрического поля в $p-n$ -переходе уменьшилась. Снова мы можем считать дрейфовый ток постоянным. Но требования к энергии диффундирующих носителей заряда теперь снижаются. Вместе с этим возрастает количество электронов и дырок, могущих преодолеть барьер, и столь же резко увеличивается сила тока диффузии основных носителей. Равновесие снова нарушается, но теперь будет явно преобладать диффузионный ток основных носителей.

Не будем забывать, что основных носителей в примесном полупроводнике неизмеримо больше, чем неосновных. Поэтому характер нарушения равновесия в двух рассмотренных случаях должен быть явно несимметричным: если напряженность электрического поля увеличивать или уменьшать на одну и ту же величину, то сила тока

во втором случае окажется значительно выше, чем в первом.

И наконец, о способе изменения напряженности поля в переходе. Оказывается, это очень просто! Достаточно к p — n -переходу подсоединить электрическую батарею последовательно с миллиамперметром. Если положительный полюс батареи присоединить к n -области, а отрицательный — к p -области, то напряженность внешнего электрического поля окажется того же направления, что и напряженность электрического поля в обедненном слое. Тогда напряженность полного электрического поля возрастет и по цепи потечет небольшой дрейфовый ток неосновных носителей. Если полярность батареи изменить, внешнее поле окажется противоположным по отношению к полю обедненного слоя, полная напряженность поля уменьшится и сила тока в цепи резко возрастет за счет диффузии основных носителей.

Итак, причина несимметричности вольт-амперной характеристики p — n -перехода заключается в резком различии концентраций основных и неосновных носителей в примесных полупроводниках!

Что общего между пашлыком и уровнем Ферми?

Читатель может пропустить этот небольшой раздел, если понятия вероятности и уровня Ферми, введенные в первой главе, показались ему слишком сложными. Здесь мы только хотим показать, что, оперируя с зонными диаграммами и не обращаясь к «внутренностям» обедненного слоя, можно столь же успешно объяснить несимметричность вольт-амперной характеристики p — n -перехода. В дальнейшем мы иногда будем пользоваться свойствами уровня Ферми там, где это не усложнит, а только упростит объяснение явлений.

Как известно, в сообщающихся сосудах устанавливается один и тот же общий уровень жидкости. Таким же свойством, но по отношению к областям полупроводников с различной проводимостью обладает уровень Ферми. Установление общего уровня Ферми на самом деле означает, что отдельные области системы вступают в энергетическое равновесие друг с другом. Если при этом каждая из областей имеет свою зонную диаграмму и свой уровень Ферми, то общий уровень как бы «протыкает»

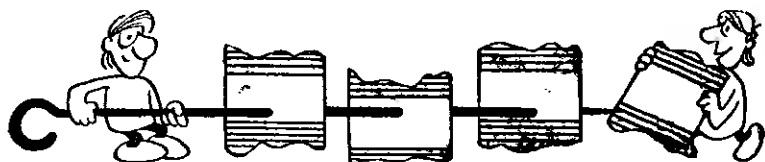


Рис. 49

все эти диаграммы вдоль всех уровней Ферми подобно шампуру, нанизывающему кусочки шашлыка (рис. 49). В этом собственно и состоит все то, что нужно нам знать об уровне Ферми.

Ранее, в первой главе, упоминалось, что уровень Ферми в полупроводнике n -типа расположен ближе к границе зоны проводимости, а в полупроводнике p -типа — ближе к границе валентной зоны. Поэтому при совмещении обеих уровней, когда p - и n -области входят в контакт, вся зонная диаграмма p -области оказывается как бы приподнятой относительно зонной диаграммы n -области, так что между краями одноименных зон образуются одинаковые перепады энергии — энергетические барьеры ΔE (рис. 50).

Наличие барьера ставит основные и неосновные носители заряда в неравноправные условия. Например, электроны из p -области могут легко «спрыгивать» со ступень-

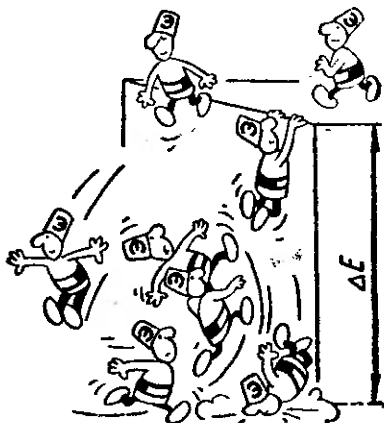
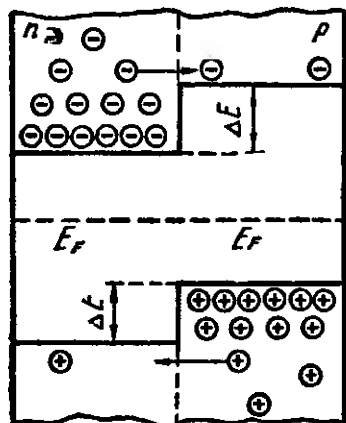


Рис. 50

ки барьера, понижая свою энергию, подобно шарикам, скатывающимся с горки. В то же время для основной части электронов n -области, занимающих нижние уровни в зоне проводимости, барьер ΔE практически непреодолим. Однако в n -области имеется очень небольшое количество электронов-«чемпионов», занимающих энергетические уровни, превышающие высоту барьера ΔE . Только эти «чемпионы» и могут переходить в p -область.

При совмещении уровней Ферми в один общий уровень высота барьера ΔE «автоматически» устанавливается именно такой, чтобы количество основных электронов-«чемпионов» и неосновных электронов, пересекающих границу областей, было бы одинаковым. Это и будет означать отсутствие полного тока через переход, а значит, и равновесие в системе.

Допустим теперь, что равновесие нарушилось и энергетический барьер p — n -перехода (см. рис. 51 слева) несколько понизился относительно прежнего барьера (средний рисунок). В этом случае напротив ступеньки барьера окажутся энергетические уровни n -области, более близкие к нижнему краю зоны проводимости. Но с приближением к этой границе (распределение Больцмана!) «населенность» уровней электронами резко возрастает. Это приводит к резкому увеличению потока основных носителей из n -области в p -область.

В то же время понижение барьера не может привести к существенным изменениям силы тока неосновных носителей: электроны из p -области так же легко «спрыгивают» с пониженной ступеньки барьера, однако в целом их количество остается значительно меньше количества основных носителей.

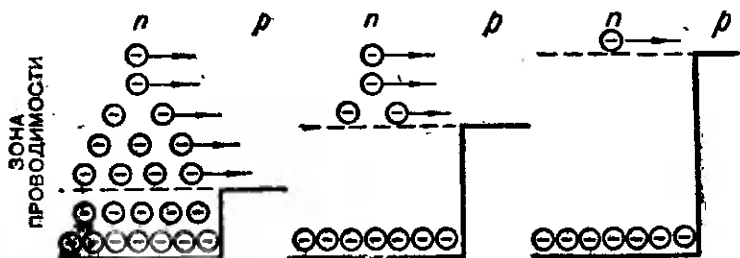


Рис. 51

Относительно дырок в валентных зонах можно сказать то же самое; при этом ток основных дырок из p -области складывается с током электронов из n -области, если учесть, что техническое направление электрического тока противоположно перемещению самих электронов.

Итак, при понижении энергетического барьера ток через p — n -переход резко возрастает за счет основных носителей заряда.

Теперь допустим, что энергетический барьер повысился (правый рисунок). Тогда ступенька барьера будет совпадать с очень «малонаселенными» энергетическими уровнями зоны проводимости n -области. Сила тока основных носителей-электронов настолько уменьшается, что становится значительно меньше силы тока неосновных носителей.

То же можно сказать и о дырочном токе.

Таким образом, при повышенном энергетическом барьере через p — n -переход протекает почти исключительно ток неосновных носителей заряда.

Теперь посмотрим, что получится, если к p — n -переходу подключить батарею постоянного тока. Ясно, что равновесие в системе при этом нарушится. Значит, уровни Ферми p - и n -областей не будут больше совпадать и разойдутся на некоторую величину $\pm \Delta E$, причем знак этой разности будет зависеть от полярности батареи. Но так как каждый уровень Ферми крепко «привязан» к своей зонной диаграмме, то это повлечет изменение энергетических барьеров на такую же величину ΔE . Значит, изменяя разность потенциалов на p — n -переходе, мы сдвигаем или раздвигаем зонные диаграммы относительно друг друга, как бы играя на «гармошке». При этом мы фактически регулируем высоту энергетического барьера ΔE .

Заметим, что наличие связи между разностью потенциалов $\Delta \phi$ и высотой энергетического барьера ΔE , например для электронов, не должно быть неожиданным: ведь энергия, приобретаемая электроном в электрическом поле, прямо пропорциональна разности потенциалов $\Delta E = q \Delta \phi$, где q — заряд электрона.

Таким образом, рассмотрение зонных диаграмм с учетом свойств уровня Ферми также приводит нас к выводу о несимметричности вольт-амперной характеристики p — n -перехода.

§ 4. ВАРИКАПЫ

p — n -переход накапливает заряды

Слово «варикап» составлено из двух английских слов — *to vary* — изменяться и *capacitance* — емкость. Значит, варикап — это прибор, емкостью которого можно управлять при помощи какого-либо внешнего воздействия.

Основной элемент варикапа — уже известный нам p — n -переход. «О какой же емкости идет речь? — спросит читатель. — Разве p — n -переход может накапливать заряды?» Оказывается, может!

Подключим к p — n -переходу источник постоянного напряжения так, чтобы положительный полюс источника был подсоединен к n -области. При этом n -область становится более положительной по отношению к p -области, чем в случае равновесия p — n -перехода, и напряженность электрического поля в обедненном слое увеличивается.

Какие изменения произойдут при этом внутри обедненного слоя? Для того чтобы напряженность электрического поля возросла, очевидно, необходимо увеличить количество «оголенных» донорных и акцепторных ионов. Если предположить, что ширина обедненного слоя не меняется, то это количество измениться также не может. Действительно, ведь концентрация примесных ионов постоянна, а сами они неподвижны. Значит, увеличение числа нескомпенсированных ионов может произойти только за счет расширения границ обедненного слоя!

Здесь снова приходит на ум игра «на гармошке»: изменяя приложенное к p — n -переходу напряжение, мы как бы раздвигаем или сдвигаем границы обедненного слоя подобно меха́м гармони. В это же время внутри слоя увеличивается или уменьшается избыточный ионный заряд — именно тот заряд, о накоплении которого шла речь в начале этого параграфа.

Теперь посмотрим, какова же зависимость емкости p — n -перехода от приложенного напряжения? Для обычного плоского конденсатора с воздушным диэлектриком такой вопрос был бы неуместным. Действительно, в таком конденсаторе заряд, накапливаемый на пластинах, прямо пропорционален внешнему напряжению. В то же время p — n -переход можно уподобить плоскому конденсатору, пластины которого с ростом напряжения автома-

тически раздвигаются на некоторое расстояние. Но, как известно, емкость плоского конденсатора обратно пропорциональна расстоянию между пластинами. Следовательно, емкость $p-n$ -перехода также должна измениться обратно пропорционально растущему напряжению. Эта зависимость показана на рисунке 52.

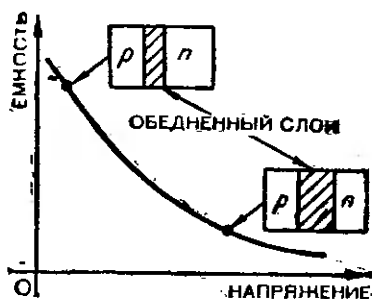


Рис. 52

Отметим, что при другой полярности приложенного напряжения, когда p -область положительна по отношению к n -области, через переход протекает большой ток основных носителей заряда. В этом случае $p-n$ -переход похож на конденсатор с очень плохой изоляцией между пластинами и, следовательно, не пригоден в качестве варикапа.

Впрочем, и при правильном подключении варикапа через переход протекает ток неосновных носителей заряда, что несвойственно обычным конденсаторам. Но сила тока, как уже упоминалось, чрезвычайно мала и почти не влияет на работу варикапа в электрических схемах.

Как можно использовать варикап в электрических схемах?

Варикап может заменить громоздкие воздушные переменные конденсаторы с взаимно перемещающимися наборами плоских металлических пластин. Это позволяет, например, осуществить настройку электрических контуров в транзисторных радиоприемниках.

Достаточно присоединить параллельно катушке индуктивности варикап таким образом, чтобы можно было подключить к его контактам постоянное регулируемое напряжение, не нарушая при этом работы электрического контура.

Посмотрите на изображенную на рисунке 53 схему. Постоянное напряжение U подключено к варикапу $C2$ через резистор $R1$ и регулируется потенциометром $R2$.

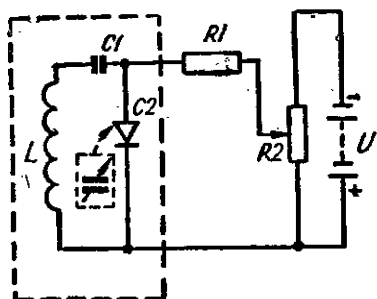


Рис. 53

Сопротивление резистора $R1$ следует выбирать достаточно большим, чтобы уменьшить расход энергии колебательного контура на джоулево тепло. Постоянный конденсатор $C1$ препятствует протеканию постоянного тока через катушку индуктивности L . Его емкость можно выбрать достаточно большой, чтобы

полная емкость контура приблизительно равнялась емкости варикапа. Вот мы и получили полный эквивалент контура с воздушным конденсатором переменной емкости!

§ 5. ТРАНЗИСТОР

Что такое транзистор?

Человек, далекий от радиотехники, наверное, ответил бы на этот вопрос так: «Это — маленький переносной радиоприемник, который часто доставляет неприятности любителям тишины».

Не многие из наших читателей, конечно, знают, что карманные радиоприемники получили такое название от полупроводникового прибора — транзистора, который является, пожалуй, самым главным элементом радиоприемной схемы.

Однако сказать о транзисторе только это — значит сказать слишком мало. Без преувеличения, транзистор можно назвать маленьким, но могучим волшебником современной техники. Этот «волшебник» со времени своего появления в 1948 г. совершил настоящую революцию в радиоэлектронике, вычислительной технике, во многих отраслях промышленности.

Что же «умеет делать» транзистор? Пожалуй, самой интересной является «способность» транзистора усиливать мощность электрических сигналов. Но перед тем как говорить об этом, давайте познакомимся с внутренним устройством транзистора.

Транзистор — «двусторонний бутерброд»

Вряд ли читателю приходилось изготавливать странный бутерброд, когда кусок хлеба намазывается маслом с обеих сторон. Но если $p-n$ -переход — бутерброд с маслом с одной стороны, то транзистор — это именно двусторонний бутерброд!

Действительно, для изготовления транзистора берут достаточно тонкую (около 50 мкм) пластину полупроводника определенного типа проводимости и с обеих сторон вплавляют металл, изменяющий тип проводимости на противоположный. Например, в исходную пластину Ge n -типа вплавляют In для получения p -областей (рис. 54). В этом случае получается «бутерброд» типа $p-n-p$.

Если, наоборот, взять в качестве исходной пластину полупроводника p -типа, то после вплавления соответствующих примесей можно получить $n-p-n$ -«бутерброд». Таким образом, транзисторы бывают $p-n-p$ -типа и $n-p-n$ -типа.

Каждая из трех областей транзистора имеет свое название. Например, в $p-n-p$ -транзисторе p -область меньших размеров называется эмиттером, p -область несколько больших размеров — коллектором, и исходная пластина — базой.

Смысл этих названий станет ясен, когда мы расскажем о работе транзистора. Сейчас же важно отметить, что каждая из областей транзистора снабжена проволочным выводом, и при включении транзистора в схему важно их не перепутать!

Убедимся на опыте в усилительных «способностях» транзистора

Для нашего опыта подойдет любой имеющийся в продаже транзистор типа $p-n-p$. (Можно взять и транзистор типа $n-p-n$, но в этом случае полярность всех батарей,

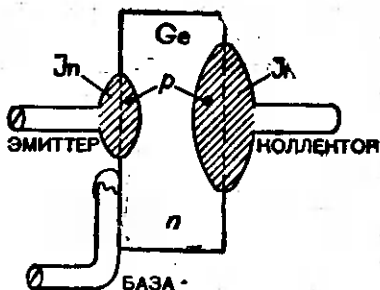


Рис. 54

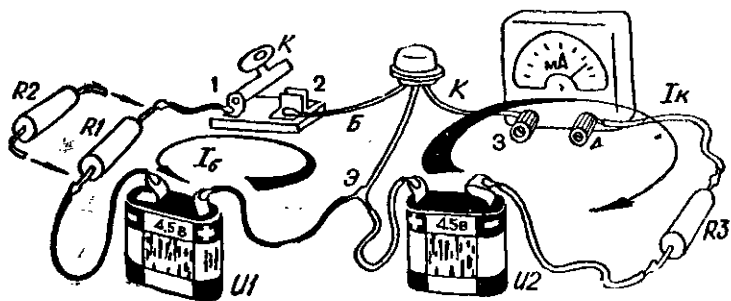


Рис. 55

изображенных на схеме, нужно изменить на противоположную.).

Кроме транзистора, для опыта необходимы две батарейки от карманного фонаря с напряжением $U=4,5$ В; три резистора с сопротивлениями $R_1=200$ кОм, $R_2=200$ кОм, $R_3=500$ Ом и школьный тестер для измерения токов и напряжений.

Соберем схему, показанную на рисунке 55 (не перепутайте выводы транзистора!), где в цепь база — эмиттер включена батарейка последовательно с резистором R_1 , а в цепь база — коллектор — другая батарейка последовательно с резистором R_3 . Между выводами 1 и 2 включим ключ K , а между выводами 3 и 4 — прибор для измерения силы тока. (Вместо батарейки U_1 можно использовать сухой элемент с напряжением 1,5 В; в этом случае значения сопротивлений R_1 и R_2 нужно снизить примерно втрое.)

Разомкнем сначала ключ K и убедимся в том, что сила тока, показываемая прибором в цепи коллектора, исчезающе мала. Замкнем ключ K — и сразу сила тока в коллекторной цепи станет равной нескольким миллиамперам.

Интересно, какова сила тока, протекающего при этом в цепи базы? Для выяснения этого перенесите прибор для измерений силы тока от выводов 3—4 к выводам 1—2; при этом, конечно, нужно разомкнуть ключ K и замкнуть выводы 3 и 4. Убедитесь в том, что сила тока в цепи базы во много раз меньше силы тока в цепи коллектора (не забудьте переключить предел измерения прибора!).

Ток базы протекает через резистор сопротивлением R_1

и переход база — эмиттер. Сопротивление перехода в прямом направлении намного меньше R_1 , поэтому сила тока в цепи базы примерно равна $4,5 \text{ В} : 2,0 \cdot 10^5 \text{ Ом} \approx 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ А} \approx 23 \text{ мкА}$.

А теперь посмотрим, как транзистор реагирует на изменения силы тока в цепи базы? Оставляя схему неизменной (прибор включен в цепь базы), прикоснемся ненадолго выводами резистора R_2 к выводам R_1 — это самый простой в наших условиях способ изменения силы тока в цепи базы. Действительно, при этом полное сопротивление цепи базы уменьшится вдвое, а сила тока в цепи базы вдвое возрастет ($4,5 \text{ В} : 10^5 \text{ Ом} = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ А} = 45 \text{ мкА}$; показания прибора должны подтвердить это!). Итак, изменяя сопротивление цепи базы, мы изменяем силу тока в ней на $45 \text{ мкА} - 23 \text{ мкА} = 22 \text{ мкА}$.

Теперь определим «реакцию» транзистора на такое изменение силы тока в цепи базы. Перенесем прибор в цепь коллектора, соответственно изменив предел измерения до нескольких миллиампер; ключ K при этом замкнем. Присоединяя ненадолго выводы резистора R_1 к выводам резистора R_2 , будем внимательно следить за изменениями силы тока в цепи коллектора по прибору. Мы заметим, что это изменение в десятки раз превышает изменение силы тока базы. Но это и означает, что транзистор усиливает изменения силы тока!

Может показаться, что на этом усилительные «способности» транзистора исчерпываются. Но это не так. Сделаем небольшое отступление и вспомним хорошо известный читателям трансформатор переменного тока.

Что же «трансформирует» трансформатор? «Напряжение!» — наиболее очевидный ответ. Действительно, подбирая соотношение количества витков в первичной и вторичной обмотках, можно, например, из сетевого напряжения 220 В получить напряжение 127 В (рис. 56).

А можно ли в цепи вторичной обмотки трансформатора получить силу тока большую, чем в цепи первичной обмотки? Можно! Если ко вторичной обмотке

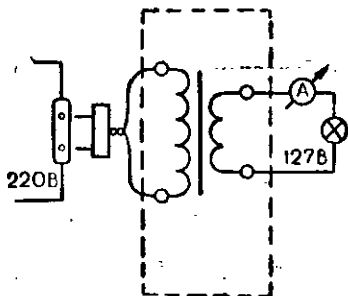


Рис. 56

подключить нагрузку, например лампу на 127 В, то окажется, что снижение напряжения с 220 В до 127 В сопровождается увеличением силы тока в такое же число раз.

«Так что же, — спросит читатель, — трансформатор — такой же усилитель тока, как и транзистор?» Конечно, нет! Все дело в том, что трансформатор не усиливает мощности переменного тока — мощность, рассеиваемая в цепях первичной и вторичной обмоток (если не учитывать дополнительных потерь в сердечнике и самих обмотках на джоулево тепло) одинакова. И это естественно, ведь никаких дополнительных источников энергии в цепи вторичной обмотки нет.

Совершенно другая картина наблюдается в транзисторе. Оказывается, что транзистор может усиливать мощность электрических сигналов.

Убедимся в том, что и в нашей схеме происходит на самом деле усиление мощности. Надо только очень внимательно разобраться в том, как определить мощность, расходуемую для управления в цепи база — эмиттер, и полезную мощность, которая рассеивается в выходной цепи коллектор — база.

К входной цепи эмиттер — база на нашей схеме очень подошло бы выражение «стрельба из пушки по воробьям». Действительно, если измерить напряжение база — эмиттер (ключ K замкнут, тестер подсоединен параллельно переходу эмиттер — база в режиме измерения напряжения), оно окажется равным всего лишь 0,3—0,6 В. Значит, от источника с напряжением U_1 отбирается для управления лишь «чайная ложка» мощности, равная произведению силы тока базы на напряжение эмиттер — база: $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ А} \cdot 0,6 \text{ В} \approx 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}$. Остальная мощность рассеивается бесполезно на резисторе R_1 .

Полезную мощность мы можем определить как мощность, рассеиваемую на сопротивлении нагрузки R_3 в выходной коллекторной цепи. Если, например, сила тока коллектора в 50 раз превышает силу тока базы, то полезная мощность будет приблизительно равна $(50 \cdot 2,3 \cdot 10^{-5})^2 \text{ А}^2 \cdot 0,5 \cdot 10^3 \text{ Ом} \approx 6,6 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}$. Усиление по мощности в этом случае оказалось равным: $6,6 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} : 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ Вт} \approx 50$ раз.

Откуда же берется дополнительная энергия в коллекторной цепи? Конечно, от источника ЭДС — батареек,

включенной между эмиттером и коллектором. Значит, базу в транзисторе можно считать регулирующим клапаном, который управляет расходом энергии в цепи коллектор — эмиттер, но сам при этом потребляет лишь небольшую энергию.

В этом смысле транзистор напоминает вакуумную лампу — триод, в которой роль клапана играет управляющая сетка. Отличие лампы от транзистора состоит в том, что мощность, необходимая для управления анодным током, в лампе еще меньше, так как сеточный ток ничтожно мал.

Электроны участвуют в «барьерном беге»

Попробуем теперь разобраться в принципах работы транзистора и объяснить его усилительные свойства. Нам при этом поможет зонная диаграмма $p-n$ -перехода.

Перед тем как изобразить эту диаграмму, обратим внимание на полярность напряжений в только что исследованной схеме. Эмиттер имеет положительный потенциал по отношению к базе. Это означает (вспомните $p-n$ -переход!), что потенциальный барьер между эмиттером и базой понижен.

Обратная картина наблюдается в коллекторном переходе: здесь p -область находится под большим отрицательным потенциалом (напряжение база — коллектор порядка 6—8 В) относительно n -области. Это значит, что барьер перехода база — коллектор существенно повышен по сравнению с эмиттерным переходом.

Проследим теперь за движением носителей заряда в транзисторе. Возьмем для этого $n-p-n$ -транзистор, потому что здесь придется говорить в основном об электронах — более привычных носителях заряда, чем дырки.

Итак, электроны, как показано на рисунке 57, принимают старт в барьерном беге. Им предстоит преодолеть два барьера — эмиттерный и коллекторный. Эмиттерный барьер понижен, поэтому электроны относительно легко преодолевают его и переходят в p -область базы. Здесь становится понятным название: эмиттер как бы выпускает носители заряда в базу (от латинского слова *emittere* — выпускать).

Каждый перешедший в базу электрон становится «чужим среди своих» — избыточным неосновным носителем. Эти электроны стремятся «затеряться в толще», т. е. рав-

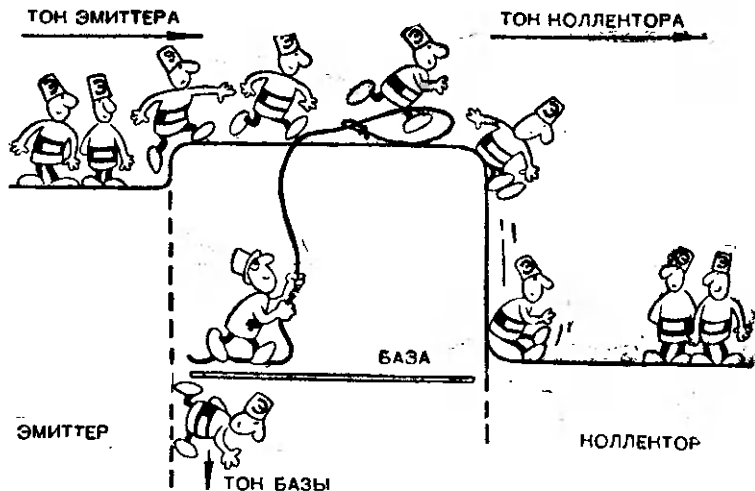


Рис. 57

номерно распределиться среди небольшого количества неосновных электронов, всегда имеющих в p -области базы. Этот процесс происходит совершенно так же, как распределение рыболовов по берегу реки, описанное в первой главе, и соответствует диффузии неосновных носителей в базе. (Расчеты показывают, что влияние небольшого электрического поля в базе на движение избыточных электронов можно не учитывать.)

Постепенно диффундируя через базу, электроны достигают коллекторного перехода. Этот переход для электронов представляет собой скорее горку, чем барьер, и электроны скатываются по этой горке в коллекторную область. Теперь понятно название «коллектор» — эта область как бы собирает носители заряда, преодолевшие базу (от латинского слова *collector* — собирающий). В связи с этим коллекторная область изготавливается несколько большей по размерам, чем эмиттер, чтобы лучше собрать разбегающиеся от эмиттера электроны.

В коллекторной области электроны оказываются, образно говоря, «у себя дома»: они снова становятся основными носителями и быстро «растворяются» в «толпе» прочих основных электронов коллекторной области. Движение электронов через коллекторный переход и представляет собой ток коллектора,

Нам осталось разобраться в следующих вопросах: как же образуется ток базы? Почему сила тока базы значительно меньше силы тока коллектора?

Электроны, попадающие в базу из эмиттера, являются «лишними», избыточными по сравнению с «собственными» свободными электронами в базе. До их прихода в базу электроны и дырки находились в состоянии равновесия: количество исчезающих из-за рекомбинации пар электрон — дырка равнялось числу рождающихся пар. Появление «лишних» электронов нарушает этот баланс, и дырки стремятся «проглотить» этот избыток, чтобы снова восстановить равновесие.

Каждое исчезновение (рекомбинация) одного избыточного электрона приводит к исчезновению одной дырки. На место «погибшей» дырки в строй встает новая дырка, которая поступает в базу через базовый контакт. Но приток одной дырки — это то же самое, что уход из базы одного электрона! Значит, исчезновение каждого электрона в базе можно просто представить себе как его уход в цепь базы через базовый контакт. Так вот откуда берется базовый ток! Этот ток на самом деле является следствием процесса рекомбинации в базе, а сила тока, очевидно, равна заряду «погибающих» в базе электронов за единицу времени.

Почему же сила тока базы столь мала? Равновесие в процессе рекомбинации в базе восстанавливается в среднем за некоторое время τ (так называемое «время жизни» избыточных электронов). Если не принять никаких мер по «спасению» избыточных электронов, их количество через время τ сократится примерно втрое, а через промежуток времени, в 5—6 раз больший, будет составлять доли процента от первоначального количества.

Поэтому базовая область специально изготавливается настолько узкой, что избыточные посетители заряда в основной массе успевают «добежать», т. е. продиффундировать, до коллекторного перехода за время, значительно меньшее τ .

В этом случае лишь небольшая часть избыточных электронов будет рекомбинировать с дырками, а следовательно, сила тока базы будет значительно меньше силы тока коллектора. Что касается силы тока эмиттера, то совершенно ясно, что сила тока эмиттера равна сумме силы тока базы и силы тока коллектора, а практически

примерно равна силе тока коллектора. (Читатель может в этом убедиться сам. Для этого в нашей экспериментальной схеме сначала нужно измерить силу тока между выводами 3 и 4, а затем, замкнув эти выводы, включить прибор между выводом эмиттера и общей точкой базового и коллекторного источников напряжения.)

Вот и все о транзисторе, хотя то, что мы здесь рассказывали, лишь малая часть возможностей этого удивительного прибора.

§ 6. ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР

Управлять по-новому!

Как ни могуществен этот маленький волшебник — транзистор, но и у него есть недостатки.

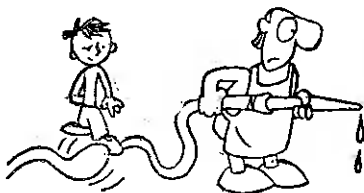
Во-первых, транзистор не может чутко реагировать на очень быстро изменяющиеся сигналы. Дело в том, что с ростом скорости изменения силы тока через эмиттерный переход становится все более заметной «неповоротливость» избыточных носителей, распространяющихся по базе вследствие диффузии.

Во-вторых, мощность, затрачиваемая в цепи базы для управления током коллектора, еще велика.

Необходимо было искать новый принцип управления током в полупроводнике, и такой способ был найден!

Представим себе дворника, поливающего улицу из резинового шланга. К шлангу подходит мальчик и слегка нажимает на него ногой. К неудовольствию дворника, напор воды резко падает, вода почти перестает течь (рис. 58). Так мальчик, не влезая внутрь шланга и прилагая весьма малые усилия, успешно управляет потоком воды в шланге.

Похожую роль играет электрическое поле в полевом транзисторе. Познакомимся с его конструкцией.



Снова бутерброд!

На первый взгляд полевой транзистор — это тот же двусторонний бутерброд, но, в отличие от обычного транзистора, в

несколько более толстым слоем «хлеба» и более симметричный. Для его изготовления можно применять те же полупроводники и те же примеси, что и для обычного транзистора. Даже структура полевого транзистора очень похожа — $p-n-p$ или $n-p-n$. В чем же отличие?

Перевернут «с ног на голову»

Принцип работы полевого транзистора буквально перевернут «с ног на голову» по сравнению с известным уже нам транзистором. В качестве управляемого потока взят поток основных носителей в базовой области, а для управления этим потоком служит электрическое поле $p-n$ -перехода.

Бывшая база снабжена двумя контактами — истоком и стоком, а области противоположного типа проводимости называются затвором и замкнуты между собой (рис. 59). Эти названия очень тесно связаны с принципом работы полевого транзистора.

Затвор «наступает» на поток электронов

Включим полевой транзистор так, как показано на рисунке 60. Сначала разомкнем ключ K . Между металлическими контактами стока, истока и полупроводниковой пластиной падение напряжения будет очень небольшим и почти все внешнее напряжение будет приложено к полупроводнику.

Прибор, подключенный к истоку, покажет, что через полупроводник течет ток. Этот ток в ос-

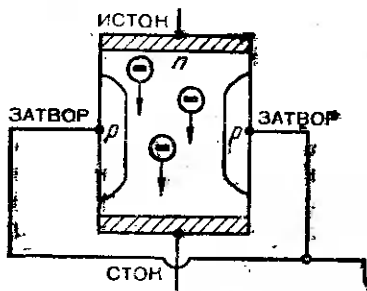


Рис. 59

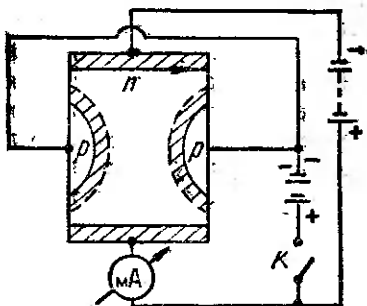


Рис. 60

новном обусловлен движением электронов — основных носителей в n -области. Свой путь электроны начинают на верхнем контакте и заканчивают на нижнем. Поэтому понятно, почему верхний контакт назван истоком, а нижний — стоком.

Что произойдет, если замкнуть ключ K ? Если к p -области приложен отрицательный потенциал относительно n -области, прибор покажет заметное уменьшение силы тока. В чем же здесь дело?

Вернемся к процессам, происходящим в обедненном слое p — n -перехода.

Между p -областями затвора и n -областью существуют p — n -переходы. При подаче отрицательного потенциала на затвор некоторая часть n -области оказывается занятой расширившимся обедненным слоем p — n -переходов.

В результате электроны на пути от истока к стоку вынуждены «пробираться» через суженную часть n -области. Этот узкий проход для электронов в полевом транзисторе называют каналом.

Увеличивая отрицательный потенциал на затворе, мы сужаем канал, сопротивление току электронов возрастает и прибор показывает уменьшение силы тока стока. При очень большом отрицательном потенциале на затворе можно свести силу тока стока практически к нулю, или, как говорят, «закрыть» транзистор.

Не правда ли, затвор очень похож на шаловливого мальчика, наступающего на шланг с водой?

Что же все-таки нового?

Самое главное в полевом транзисторе состоит в том, что управляемый ток — это ток основных носителей заряда, текущий под действием электрического поля в канале. А ток основных носителей гораздо лучше реагирует на быстрые внешние сигналы. Дело в том, что основные носители заряда распространяются в канале посредством дрейфа. Дрейф в электрическом поле — относительно быстрый, легко управляемый процесс.

В обычном же транзисторе неосновные носители заряда достигают коллектора посредством диффузии. При этом они, образно говоря, совершают много «лишних» движений и не «экономят время».

Что касается мощности, необходимой для управления, то она в полевом транзисторе совсем невелика: ведь

p — n -переходы затвор — канал находятся в закрытом состоянии и через них может протекать лишь ничтожный ток утечки! В этом смысле полевой транзистор по свойствам ближе к вакуумному триоду, чем к обычному транзистору.

Но можно еще больше понизить мощность управления. Это осуществляется в новой разновидности полевого транзистора — МОП-транзисторе!

§ 7. МОП-ТРАНЗИСТОР

И еще раз о бутерброде с маслом

Вернемся сначала к вопросу: как можно управлять проводимостью полупроводника? «А, это старый разговор о бутерброде, в котором часть хлеба превращается в масло», — вспоминает читатель. Да, мы уже говорили о том, что для этих целей можно ввести в кристаллическую решетку полупроводника атомы примеси. Такой способ можно условно назвать «намазыванием масла навечно». Действительно, после такой процедуры нельзя получить снова «хлеб без масла», т. е. прежнюю проводимость полупроводника.

А нельзя ли научиться так управлять проводимостью полупроводника, чтобы можно было обратимым образом регулировать «толщину слоя масла», а если нужно, то вновь вернуться к исходному полупроводнику?

Таким волшебным средством послужит электрическое поле!

Пластина полупроводника в электрическом поле

Поместим пластину полупроводника, например, n -типа между обкладками заряженного плоского конденсатора (рис. 61). Основные носители заряда — электроны — под действием электрического поля начнут смещаться к левой границе пластины, оставляя на противоположной границе нескомпенсированный положительный заряд неподвижных ионов донорной примеси. Небольшое число неосновных носителей — дырок — будет переходить на правую границу пластины, оставляя на левой границе такое же небольшое число отрицательных акцепторных ионов (ионы изображены более крупными кружками).

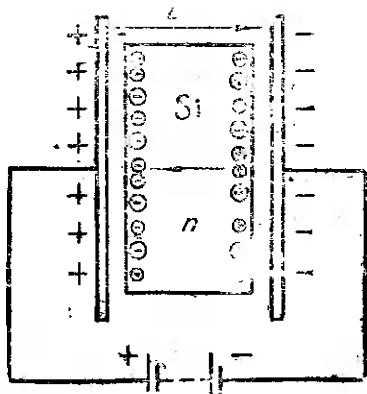


Рис. 61

Смещение зарядов приведет к возникновению внутреннего поля, противоположного внешнему. Напряженность этого поля будет расти до тех пор, пока напряженность полного электрического поля внутри пластины не окажется равной нулю.

Эта ситуация напомнит читателям поведение металла во внешнем электрическом поле. Однако в поведении полупроводников имеется очень важное отличие.

Зададимся вопросом: какова же толщина слоя вблизи поверхности пластины, в котором концентрация электронов заметно выше, чем в остальном объеме полупроводника? Ведь процессу концентрации электронов на поверхности должен препятствовать обратный процесс их взаимного расталкивания?

Расчеты показывают, что избыточные электроны сосредоточены в слое, толщина которого равна так называемой длине Дебая L_D . (П. Дебай — голландский физик, известный своими работами в области физики твердого тела.) Эта длина обратно пропорциональна корню квадратному из концентрации свободных носителей заряда.

Концентрация свободных электронов в полупроводниках n -типа по крайней мере на несколько порядков ниже, чем в металлах, поэтому длина Дебая для полупроводников значительно больше, чем для металлов. Например, в кремнии, применяемом для изготовления приборов, длина Дебая может составлять доли или единицы микрометра. В пределах этого слоя концентрация электронов постепенно спадает от некоторого конечного значения до концентрации основных носителей в объеме полупроводника.

Для того чтобы удержать в равновесии такое неравномерное распределение электронов, необходимо внутреннее электрическое поле. Отсюда становится ясно, что электрическое поле в полупроводнике должно быть равно

нулю везде, кроме приповерхностного слоя толщиной L_D . В этом слое напряженность электрического поля E также постепенно снижается до нуля, как бы «повторяя» распределение избыточных электронов (рис. 62).

Это открывает неожиданные возможности для управления проводимостью приповерхностного слоя полупроводника.

p — n -Переход — без всякого сплавления!

Посмотрите еще раз внимательно на рисунок, изображающий распределение концентрации электронов вблизи поверхности полупроводника, помещенного во внешнее электрическое поле. В слое толщиной L_D в среднем концентрация основных носителей — электронов — выше, чем в остальном объеме пластины. Но это должно означать, что проводимость поверхностного слоя выше, чем проводимость остальной пластины!

За счет влияния электрического поля получился такой же эффект, как если бы в слой толщиной L_D мы добавили дополнительную донорную примесь.

Если пластину полупроводника удалить из электрического поля, все встанет на свои места — проводимость пластины во всем объеме вновь станет одинаковой.

Итак, электрическое поле позволяет обратимо изменять поверхностную проводимость полупроводника.

Обратимся теперь к зонной диаграмме. Сначала посмотрим, чему соответствует увеличение концентрации электронов на поверхности полупроводника n -типа. Вспомним, что с ростом концентрации донорной примеси n , следовательно, с увеличением концентрации сво-

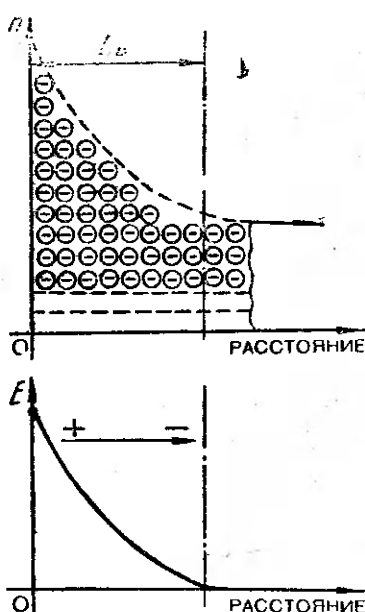


Рис. 62

бодных электронов уровень Ферми приближается к границе зоны проводимости.

В нашем случае увеличение концентрации электронов достигнуто другими средствами — но ведь уровень Ферми этой разницы «не чувствует»! Все равно он должен, следуя за ростом концентрации на поверхности полупроводника, приближаться к границе зоны проводимости.

Но что же к чему приближается? Уровень Ферми к зоне проводимости или наоборот? Здесь уместно вспомнить известную поговорку: «Сено к лошади не ходит». В нашем случае «сено» — уровень Ферми. Действительно, в силу свойств самого уровня Ферми при равновесии во всей системе он должен оставаться постоянным. Остается заключить, что «лошадь» — граница зоны проводимости — должна пойти навстречу уровню Ферми, т. е. изогнуться вниз.

Что при этом будет с валентной зоной? Внутреннее строение полупроводника при движении электронов к поверхности никак не изменяется. Следовательно, ширина запрещенной зоны должна остаться прежней. А это означает, что и граница валентной зоны будет, «как тень», следовать за границей зоны проводимости. Все это приведет к изгибу вниз всей зонной диаграммы (за исключением уровня Ферми!). Этот изгиб будет замечен, естественно, только на толщине слоя Дебая.

Теперь нам остается только использовать зонную диаграмму до конца, чтобы выяснить еще одну интереснейшую возможность управления электрическим полем.

Изменим направление напряженности электрического поля на противоположное и постепенно будем увеличивать напряженность. Теперь, очевидно, зонная диаграмма

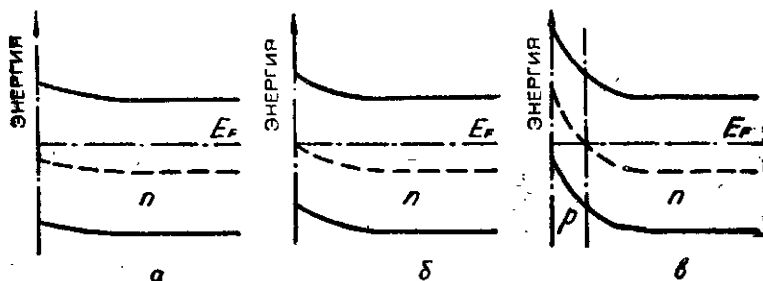


Рис. 63

«поползет» вверх (рис. 63, а). Сначала в слое Дебая концентрация электронов несколько понизится; это будет соответствовать удалению уровня Ферми от края зоны проводимости.

Затем с ростом напряженности поля уровень Ферми на поверхности полупроводника достигает середины запрещенной зоны. Это значит, что в поверхностном слое полупроводника останется так мало электронов, что их концентрация будет равна концентрации неосновных носителей — дырок. Электрическое поле превратило полупроводник в собственный (рис. 63, б)!

И наконец, при дальнейшем росте напряженности поля наступает интересный момент — уровень Ферми пересекает середину запрещенной зоны и приближается к краю валентной зоны (рис. 63, в). Но ведь это соответствует тому, что полупроводник на поверхности приобретает проводимость *p*-типа! Поистине неожиданное и замечательное проявление влияния электрического поля!

Таким образом, электрическое поле «может» все то, что с таким трудом достигается специальными технологическими приемами. Посмотрим теперь, как реально создать полупроводниковую структуру, в которой преимущества электрического поля использовались бы в полной мере.

Вместо воздушного конденсатора — окисление полупроводника

Если обычный транзистор мы сравнивали с двусторонним бутербродом, то транзистор, о котором пойдет речь теперь, можно сравнить с изысканным кондитерским изделием — настолько изощренной и сложной кажется на первый взгляд «кухня» его изготовления.

Все начинается с однородной кремниевой пластины, например, *p*-типа. Путем нагревания примерно до 1200°C в кислороде пластину окисляют, т. е. покрывают тонкой — до 1 мкм — пленкой диоксида кремния SiO_2 . Эта пленка, как оказалось, обладает превосходными диэлектрическими свойствами.

Затем на SiO_2 «намазывают» слой вещества, так называемого фоторезиста, обладающего интересными химическими свойствами: после освещения фоторезист перестает растворяться в плавиковой кислоте, хотя растворяется в серной кислоте.

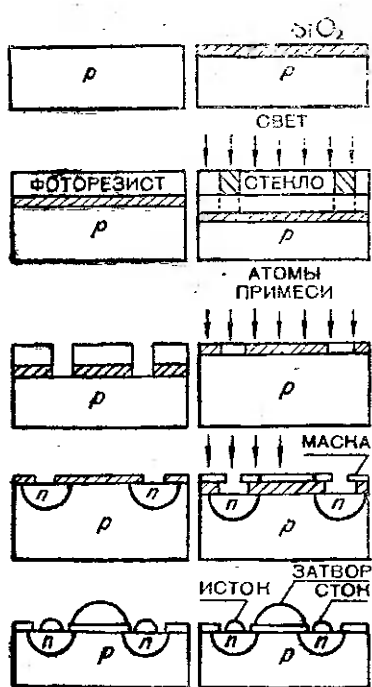


Рис 64

кислоту. В кислоте происходит вытравливание не только неосвещенных участков фоторезиста, но и находящихся под ними областей слоя SiO_2 . Остатки фоторезиста легко удаляются при полоскании в серной кислоте, которая, кстати, совсем не действует на оставшуюся пленку SiO_2 .

Итак, в SiO_2 получились небольшие отверстия — их образно называют «окнами». Полученную структуру опять помещают в печь с парами атомов донорной примеси. При высокой температуре донорные атомы внедряются в кристаллическую решетку кремния (вот зачем понадобились окна!) и образуют две области n-типа — это исток и сток (совсем как в полевом транзисторе с p—n переходами). Остальную часть пластины кремния от проникновения примеси надежно защищает слой SiO_2 .

После этого на полученную структуру накладывают

Как же используются свойства фоторезиста? С помощью этих свойств в пленке SiO_2 можно образовывать микроскопические, но с точными размерами отверстия, которые другим способом получить просто невозможно! Посмотрите на рисунок 64. Сначала на фоторезист накладывают прозрачную стеклянную пластину с затемнениями как раз в тех местах, которые соответствуют будущим отверстиям в SiO_2 . Теперь весь этот «спирог» освещают, и фоторезист становится устойчивым к плавиковой кислоте, за исключением тех темных мест, на которые не попал свет.

Стеклянную пластину снимают и опускают все остальное в плавиковую

тонкую металлическую пластину с отверстиями (эту пластину очень метко называли «маской»). Маска закрывает почти всю пленку SiO_2 , кроме небольших участков в центре истока и стока и в середине «островка» SiO_2 , расположенного между истоком и стоком.

Структуру опять помещают в особую печь. В этой печи находится кусочек металла, который настолько сильно нагревается, что начинает испускать поток атомов прямо на маску. Эти атомы оседают как раз в тех местах структуры, против которых находятся отверстия маски. Этот процесс называют напылением металла на структуру.

И наконец, к напыленным участкам металла припаивают тонкие проволочки — и транзистор готов!

Как же теперь его назвать? Обратите внимание на то, что, так же как в полевом транзисторе с p — n -переходом, здесь имеются исток и сток. Однако область затвора имеет совершенно иную структуру. Здесь явно чередуются три области — металл, затем оксид (SiO_2) и наконец полупроводник p -типа. Вот из-за этой особенности транзистор и называли «МОП-транзистором». «МОП» — это первые буквы слоев, составляющих структуру затвора: металл — оксид — полупроводник.

Как затвор управляет работой МОП-транзистора?

Посмотрите на рисунок 65. На берегу « n -истока» «собрались» электроны, «желающие» перейти на другой берег — « n -сток». Однако электроны не смогут переправиться через канал до тех пор, пока затвор не соединит разводной мост.

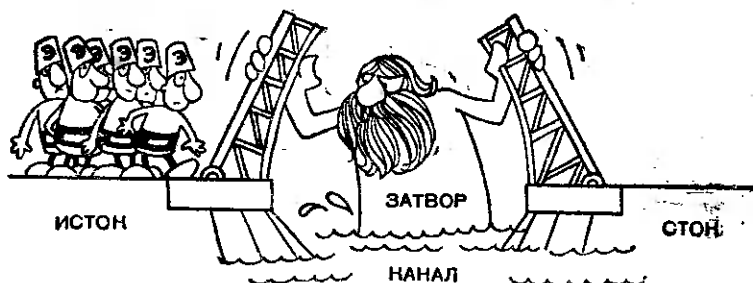


Рис. 65

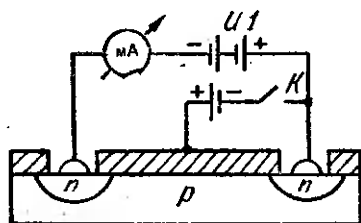


Рис. 66

гоком и стоком, покажет, что сила тока в цепи равна нулю, так как между n -областями «мост окажется разведенным». Действительно, на пути протекания тока между истоком и стоком оказываются два перехода $n-p$ и $p-n$. Для одного из них батарея $U1$ включена в обратном направлении, и, следовательно, это соединение будет обладать очень высоким сопротивлением.

Как же соединить этот «разводной мост»? Замкнем ключ K и будем постепенно увеличивать положительное напряжение на затворе. Электрическое поле через диэлектрическую прокладку — пленку SiO_2 — частично проникнет в приповерхностный слой полупроводника и начнет изменять его проводимость. В тот момент, когда уровень Ферми пересечет середину запрещенной зоны, тип проводимости полупроводника изменится на противоположный и на поверхности p -области образуется канал n -типа — «зеленая улица», для электронов. $n-p$ -Переходы исчезают, «разводной мост» соединен!

Если следить за показаниями прибора в цепи исток — сток, отмечая силу тока стока, то все будет происходить, как показано на приведенной вольт-амперной характеристике (рис. 67). Сначала сила тока стока близка к нулю. Когда напряжение между затвором и истоком достигает порогового напряжения, появляется n -канал и сила тока стока резко возрастает. При увеличении напряжения на затворе



Рис. 67

n-канал расширяется, его проводимость увеличивается и сила тока продолжает расти. Вот так и управляет электрическое поле работой МОП-транзистора!

Ну а почему же мощность управления в МОП-транзисторе еще меньше, чем в обычном полевом транзисторе? Да потому, что пленка SiO_2 , как мы уже говорили, обладает хорошими диэлектрическими свойствами. А ток через такой диэлектрик практически равен нулю. Поэтому для управления работой МОП-транзистора можно применить очень слабый по мощности источник напряжения.

§ 8. ОТ ТРАНЗИСТОРОВ — К ИНТЕГРАЛЬНЫМ СХЕМАМ

Конечно, читателю наверняка вся процедура изготовления МОП-транзистора показалась сложной, многоступенчатой. Однако не надо спешить с выводами и думать, что это — неоправданная сложность.

Все дело в том, что эти методы изготовления легко распространить на множество подобных транзисторов, автоматизировать процесс и в одном технологическом цикле получить десятки и сотни транзисторов, уместящихся на одной и той же пластине кремния. При этом вовсе нет необходимости разрезать пластину на отдельные транзисторы и каждый из них помещать в отдельный корпус.

Оказывается, такая технология открывает пути для совершенно новых полупроводниковых устройств — так называемых интегральных схем. Слово «интегральный» здесь означает выполнение сразу многих функций в одном полупроводниковом кристалле.

Представьте себе совершенно нереальную для современного города картину: каждый магазин, почта, телеграф, прачечная, парикмахерская и многие другие бытовые учреждения построены в виде отдельных одноэтажных домиков, каждый на своем фундаменте, со своим отоплением, канализацией, электросетью. Сколько лишних кабелей, труб было бы проведено к этим домикам, сколько лишних путей сообщения соединяли бы эти домики и как разросся бы по площади большой город! Конечно, гораздо более экономично и целесообразно совмещать сразу несколько таких предприятий в одном здании на одном фундаменте, а иногда и совмещать их с жилыми домами.

Точно так же преобразились электронные схемы с появлением интегральных схем. Их общий «фундамент» —

полупроводниковая пластина, в «теле» которой в едином технологическом цикле готовятся все необходимые элементы схем и осуществляются их соединения.

В современной интегральной схеме на одной пластине полупроводника могут размещаться сотни и тысячи элементов. Например, в интегральной схеме, применяемой в современных наручных часах «Электроника Б6-202», расположено одних только транзисторов около 3000 штук, не считая других элементов и сложнейшей паутины соединений!

Уже сейчас интегральные схемы широко внедряются в современную электронику и вычислительную технику. Возможно, некоторые читатели уже научились считать на миниатюрных вычислительных машинах или носят на руках часы, построенные на интегральных схемах.

Все повторяется! Эти «крошки» вытесняют транзисторы, так же как когда-то транзисторы вытеснили вакуумные лампы. Наука и техника продолжают свое стремительное развитие!

Вот и подошла к концу «история» об электрических свойствах металлов, полупроводников и о полупроводниковых приборах. Мы старались рассказать ее так, чтобы читатели почувствовали, что в «мире электронов и дырок» все одновременно и сложно и просто, все подчиняется строгим и часто красивым закономерностям.

Конечно, мы рассказали не все; многое удивительное и интересное осталось за пределами нашей «истории», но не в этом главное.

Мы хотели подчеркнуть мысль, что в основе любого полезного прибора, устройства лежат физические закономерности. Наука, в частности физика, — вот что питает современные достижения в технике.

Именно с этой целью из всего обширного семейства полупроводниковых приборов мы отобрали те, в которых очень ярко отражается эта связь науки и техники.

Но мы также старались показать, что не только физика решает успех в развитии современной техники. Важнейшим моментом является технология, т. е. решение вопроса, как и из чего сделать тот или иной прибор. Именно поэтому в книге там, где это возможно, мы рассказывали о «кухне» изготовления приборов.

Нужно отметить, что и в развитии самой физики металлов и полупроводников технологические проблемы сыграли немалую роль. Например, физика полупроводников не сделала бы таких больших шагов в своем развитии, если бы ученые не научились выращивать достаточно совершенные и чистые кристаллы.

И наконец, хотелось бы, чтобы читатель понял, что

при изучении физики и ее технических применений очень важно провести даже кажущийся очень простым эксперимент.

Мы надеемся, что те сведения, которые наши читатели почерпнули из этой книги, помогут им как в изучении физики, так и в стремлении сделать что-то новое для физического кабинета школы или школьного физического кружка.

В дальнейшем же возможно, что именно вам, дорогие читатели, придется участвовать в разработке и производстве еще более удивительных и замечательных новых приборов. В добрый путь!

СОДЕРЖАНИЕ

Введение

(3)

Глава I

МЕТАЛЛЫ, ПОЛУПРОВОДНИКИ, ИЗОЛЯТОРЫ

(7)

1. Электрический ток в металлах (7). 2. Закон Ома (12). 3. Металлы, полупроводники, изоляторы (16). 4. Эффект Холла (18). 5. Зонная модель вещества (22). 6. Фотопроводимость (30). 7. Собственная проводимость полупроводника. Электроны и дырки (32). 8. Примесная проводимость полупроводников. Электронные полупроводники (36). 9. Дырочные полупроводники (40). 10. Рекомбинация. Динамическое равновесие (44). 11. Уровень Ферми (47). 12. Диффузия и дрейф носителей заряда (52).

Глава II

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

(54)

1. Терморезисторы (54). 2. Фоторезисторы (58). 3. $p-n$ -Переход (60). 4. Варикапы (72). 5. Транзистор (74). 6. Полевой транзистор (82). 7. МОП-транзистор (85). 8. От транзисторов — к интегральным схемам (93).

Заключение

(95)